

# Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in technischen Systemen

vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Tillmann Freund**

aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

Tag der Einreichung: 13.11.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 17.01.2018

Darmstadt 2018

D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:  
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-72316  
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7231>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,  
E-Publishing-Service der TU Darmstadt  
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>  
[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:  
Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente pmd der Technischen Universität Darmstadt aus der Bearbeitung des Teilprojektes A2 im Sonderforschungsbereich SFB 805 Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus.

Danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die vielen fachlichen Anregungen und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Du hast in vielen, teilweise auch kontroversen, Diskussionen dazu beigetragen den Anwendungsbezug der vorliegenden Arbeit sicherzustellen. Deine Beispiele aus der industriellen Anwendung waren inspirierend und haben die vorliegende Arbeit sehr bereichert. Die gemeinsame Arbeit mit Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner hat meine fachliche und persönliche Entwicklung geprägt und ist somit wichtiger Bestandteil für das Gelingen dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates und für das damit verbundenen Interesse an dieser Arbeit. Mit Ihrer wissenschaftlichen Expertise im Bereich der methodischen Beherrschung von Unsicherheit waren Sie der ideale Ansprechpartner für die vorliegende Dissertation.

Herrn Dr. Klobardanz möchte ich an dieser Stelle dafür danken, dass er mich überredet hat aus der Industrie an die Universität zurückzukehren.

Für die angenehme Zeit am Fachgebiet pmd danke ich allen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen. Ich werde mich immer gerne an diese intensive, gemeinsame Zeit mit Euch erinnern. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle die Ecos, die Blechbrüder und natürlich Janbert und Lotzbert.

Auch meinen hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern möchte ich für die gute Zusammenarbeit danken. Eure Anregungen und Ideen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich für ihre große Unterstützung weit über den Rahmen der Dissertation hinaus. Ich bin sehr froh Euch zu haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Nele. Deine Hilfe, sei es in Form von moralischer Unterstützung in schwierigen Phasen oder Rücken freihalten und Verständnis beim Endspurt, hat mich sehr unterstützt. Schließlich danke ich meiner Tochter Matilda für die Ablenkung und die Erinnerung daran, dass es ein Leben außerhalb des Arbeitszimmers gibt.

Darmstadt, im Februar 2018

Tillmann Freund



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Aufbau der Arbeit . . . . .                                   | 6         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Forschung</b>                                    | <b>9</b>  |
| 2.1      | Grundlagen der Konstruktionsmethodik . . . . .                | 9         |
| 2.1.1    | Grundlagen zu Modellen und Methoden . . . . .                 | 9         |
| 2.1.2    | Theorie technischer Systeme . . . . .                         | 11        |
| 2.1.3    | Theorie der Entwicklungsprozesse . . . . .                    | 25        |
| 2.2      | Grundlagen zu Unsicherheit . . . . .                          | 35        |
| 2.2.1    | Grundlagen zur Beherrschung von Unsicherheit . . . . .        | 40        |
| 2.2.2    | Robust Design . . . . .                                       | 40        |
| 2.2.3    | Einsatz von Hilfsmitteln im Robust Design . . . . .           | 44        |
| 2.3      | Zusammenfassung des Standes der Forschung . . . . .           | 49        |
| <b>3</b> | <b>Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit</b>            | <b>51</b> |
| <b>4</b> | <b>Erarbeiten der zentralen Modelle</b>                       | <b>56</b> |
| 4.1      | Modell technischer Systeme . . . . .                          | 56        |
| 4.2      | Systematik der Robust Design-Wirkungsweisen . . . . .         | 63        |
| 4.2.1    | Robust Design-Wirkungsweisen in der Produktion . . . . .      | 64        |
| 4.2.2    | Robust Design-Wirkungsweisen in der Nutzung . . . . .         | 68        |
| 4.2.3    | Kriterien zur Einstufung von Konstruktionshinweisen . . . . . | 77        |
| 4.3      | Vorgehensmodell der <i>SmArtSys</i> . . . . .                 | 79        |
| <b>5</b> | <b>Konstruktionshinweise zur Entwicklung robuster Systeme</b> | <b>89</b> |
| 5.1      | Identifikation von Konstruktionshinweisen . . . . .           | 90        |
| 5.1.1    | Aufbau der Literaturrecherche . . . . .                       | 90        |
| 5.1.2    | Einheitliches Begriffssystem . . . . .                        | 94        |
| 5.2      | Einstufung der Konstruktionshinweise . . . . .                | 97        |
| 5.2.1    | Reflektion der Unsicherheit bei der Einstufung . . . . .      | 99        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6 RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen</b> | <b>103</b> |
| 6.1 Fertigungsprozesse . . . . .  | 103        |
| 6.1.1 Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung . .                                 | 104        |
| 6.1.2 Bauweisen zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung . .                                  | 105        |
| 6.1.3 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung .                                  | 107        |
| 6.2 Montageprozesse . . . . .   | 113        |
| 6.2.1 Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage . .                                   | 113        |
| <b>7 RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen</b>    | <b>117</b> |
| 7.1 Funktionaler Zusammenhang . . . . .   | 119        |
| 7.1.1 Grundregeln zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit . . . . .                                   | 119        |
| 7.1.2 Prinzipien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit . . . . .                                    | 121        |
| 7.2 Funktionaler Zusammenhang - Umgang mit Störgrößen . . . . .   | 141        |
| 7.2.1 Prinzipien zum Umgang mit Störgrößen . . . . .  | 141        |
| 7.2.2 Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen . . . . .   | 144        |
| <b>8 Evaluation der SmArtSys anhand einer industriellen Anwendung</b>                                   | <b>149</b> |
| 8.1 Herangehensweise an die Evaluation von Entwicklungsmethoden . . . . .                               | 149        |
| 8.2 Anwendung der SmArtSys an einer Autogenbrennschneidemaschine . . .                                  | 150        |
| 8.2.1 Gestaltung des Radsystems mit der SmArtSys . . . . .  | 152        |
| 8.2.2 Gestaltung der Höhenverstellung mit der SmArtSys . . . . .  | 157        |
| 8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .  | 165        |
| <b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>168</b> |
| <b>A Bei der Literaturrecherche berücksichtigte Werke</b>   | <b>171</b> |
| <b>B RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen</b> | <b>184</b> |
| B.1 Fertigungsprozesse . . . . .  | 184        |
| B.1.1 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung .                                  | 184        |
| B.2 Montageprozesse . . . . .   | 202        |
| B.2.1 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage . .                                  | 202        |
| <b>C RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen</b>    | <b>212</b> |
| C.1 Funktionaler Zusammenhang . . . . .   | 212        |
| C.1.1 Richtlinien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit . . . . .                                   | 212        |
| C.2 Funktionaler Zusammenhang - Umgang mit Störgrößen . . . . .   | 213        |
| C.2.1 Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen . . . . .   | 213        |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| C.3              | Faktor Mensch . . . . .  | 219        |
| C.3.1            | Prinzipien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen . . . . .  | 219        |
| C.3.2            | Richtlinien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen . . . . . | 230        |
| C.4              | Parallelprozesse . . . . .   | 237        |
| C.4.1            | Richtlinien zur Beherrschung von Kriechen und Relaxation . . . .                   | 237        |
| C.4.2            | Richtlinien zur Beherrschung von Korrosion . . . . .                               | 237        |
| C.4.3            | Richtlinien zur Beherrschung von Verschleiß . . . . .                              | 243        |
| C.5              | Prozessvarianten . . . . .   | 246        |
| C.5.1            | Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in Prozessvarianten                   | 246        |
| <b>D</b>         | <b>Evaluation</b>  | <b>252</b> |
| D.1              | Detaillierte Dokumentation der SmArtSys . . . . .                                  | 252        |
| D.1.1            | Gestaltungszone Höhenverstellung . . . . .   | 252        |
| <b>Literatur</b> |  | <b>270</b> |



## Abkürzungsverzeichnis

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>BPMN</b>     | Business Process Model and Notation                        |
| <b>CAD</b>      | Computer-Aided Design                                      |
| <b>DFG</b>      | Deutsche Forschungsgemeinschaft                            |
| <b>DfMA</b>     | Design for Manufacturing and Assembly                      |
| <b>DfSS</b>     | Design for Six Sigma                                       |
| <b>DfX</b>      | Design for X   |
| <b>DIN</b>      | Deutsches Institut für Normung                             |
| <b>DoE</b>      | Design of Experiments                                      |
| <b>DtX</b>      | Design to X  |
| <b>EMV</b>      | Elektromagnetische Verträglichkeit                         |
| <b>FEM</b>      | Finite-Elemente-Methode                                    |
| <b>GPPE</b>     | Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung              |
| <b>MTS</b>      | Modell technischer Systeme                                 |
| <b>PE</b>       | Produktentwicklung   |
| <b>PEP</b>      | Produktentwicklungsprozess                                 |
| <b>pmd</b>      | Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente    |
| <b>RD</b>       | Robust Design  |
| <b>RD SIG</b>   | Special Interest Group Robust Design                       |
| <b>RopEx</b>    | Robustus per Experientiam                                  |
| <b>SFB 805</b>  | Sonderforschungsbereich 805                                |
| <b>SmArtSys</b> | Synthesemethode zur Ableitung robuster technischer Systeme |
| <b>UMEA</b>     | Uncertainty Mode and Effects Analysis                      |
| <b>VDI</b>      | Verein deutscher Ingenieure                                |

## Symbolverzeichnis

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $\alpha, \beta$             | Winkel [Grad]                              |
| $l, a, b, r, d, e, x, R, t$ | Länge [mm]                                 |
| $A$                         | Fläche [mm <sup>2</sup> ]                  |
| $I$                         | Flächenträgheitsmoment [mm <sup>4</sup> ]  |
| $W$                         | Widerstandsmoment [mm <sup>3</sup> ]       |
| $F$                         | Kraft [N]                                  |
| $M$                         | Moment [Nm]                                |
| $\tau$                      | Torsionsbeanspruchung [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $Z$                         | Zwangsbedingung [-]                        |
| $S$                         | Schlüsselweite [mm]                        |
| $w'_{\max}$                 | Neigung [Rad]                              |
| $\mu$                       | Gleitreibungskoeffizient [-]               |
| $\mu_0$                     | Haftreibungskoeffizient [-]                |





## Kurzfassung

Unsicherheit in technischen Systemen führt, beispielsweise in Form von Rückrufen, zu erheblichen Kosten. Zusätzlich kann Unsicherheit zu unvorhersehbarem Verhalten technischer Systeme bis hin zum totalen Versagen führen, wodurch unter Umständen auch eine erhebliche Gefährdung des Menschen möglich ist. Ein üblicher Weg zur Vermeidung dieser Unglücke ist die Überdimensionierung von Systemen. Allerdings führt diese Maßnahme zu höherem Ressourceneinsatz, sowohl in Bezug auf die verwendete Materialmenge, als auch, vor allem bei bewegten Systemen, in Bezug auf Betriebsstoffe. Die Beherrschung von Unsicherheit ist also von großer wirtschaftlicher und, im Kontext endlicher Ressourcen, auch von gesellschaftlicher Relevanz.

Bisherige Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit konzentrieren sich auf spätere Phasen in der Produktentwicklung und basieren meist auf stochastischen Verfahren zur Quantifizierung der Robustheit und der Optimierung von bereits festgelegten Bauteilgeometrien unter Berücksichtigung von Schwankungen. Bedarf besteht besonders in Form von qualitativen Methoden, die bereits in früheren Phasen der Produktentwicklung zur Synthese eingesetzt werden können. Eine vielversprechende Möglichkeit hierfür stellt die Anwendung von Konstruktionshinweisen dar. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher die Tauglichkeit einer großen Anzahl allgemeiner Konstruktionshinweise für die Beherrschung von Unsicherheit zu untersuchen und die identifizierten Konstruktionshinweise in Form einer Methode für die Produktentwicklung zugänglich zu machen.

Unsicherheit tritt in allen Lebenslaufprozessen des technischen Produktes auf, entsprechend muss eine Beherrschung von Unsicherheit ebenfalls alle Lebenslaufprozesse miteinbeziehen. Das *Modell technischer Systeme* bietet die Möglichkeit verschiedene bekannte Wirkungsweisen von Robust Design-Maßnahmen zu konsolidieren und systematisiert zu erfassen. Die elf im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Robust Design-Wirkungsweisen werden als Einstufungskriterien zur Beurteilung allgemeiner Konstruktionshinweise eingesetzt.

Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche in der allgemeinen konstruktionswissenschaftlichen Literatur und der Robust Design-Literatur werden insgesamt etwa 1400 allgemeine Konstruktionshinweise identifiziert, die nach Lebenslaufphasen und Konkretisierungsgrad klassifiziert dokumentiert werden. Mit Hilfe der RD-Wirkungsweisen erfolgt eine Beurteilung der RD-Tauglichkeit der allgemeinen Konstruktionshinweise. Durch Zusammenfassen redundanter Hinweise entsteht schließlich der sogenannte *RopEx-Katalog*.

Auf Basis der vorhandenen Vorgehensmodelle zum taktischen Gestalten und für die Anwendung von Konstruktionsrichtlinien im Robust Design kann der *RopEx-Katalog* zur Synthese robuster technischer Systeme verwendet werden. Die Methode, bestehend aus dem *Modell technischer Systeme*, dem *Vorgehensmodell* und dem *RopEx-Katalog*, wird unter dem Akronym *SmArtSys* zusammengefasst. In einem Evaluationsprojekt im industriellen Umfeld wird die *SmArtSys* im realen Konstruktionsalltag verwendet. Die Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit der *SmArtSys*.

## **Abstract**

Uncertainty in technical systems leads e.g. through recalls to increasing cost. Additionally uncertainty can cause unpredictable system behaviour up to total system failure which may lead to substantial safety endangerings. The usual procedure to avoid these problems is to overcome uncertainty through overdimensioning, which leads to additional resource-application. Controlling uncertainty therefore is of high economic and, in the context of finite resources, also societal interest.

Existing methods focus mainly on later stages of product development and mostly base on stochastic methods to quantify system-robustness considering deviations in system properties. The actual challenge is providing methods that can process qualitative information to be able to control uncertainty already in early design stages in the sense of frontloading. One promising approach is the application of experience based design guidelines. Aim of this dissertation is therefore the investigation of existing design guidelines in terms of their applicability in robust design tasks and to transform the findings in a comprehensive method.

Uncertainty occurs in all lifecycle-processes of technical systems, controlling uncertainty must therefore also include all of these processes too. The proposed model of technical systems enables for consolidation of all known actions to improve system-robustness. These robust design actions serve as criteria to assess general design guidelines. Based on a profound literature research 1400 design guidelines are identified and classified according to their applicability in robust design. The resulting database, the RopEx-catalogue, consists of 450 design guidelines that can be used in robust design tasks. The RopEx catalogue, an appropriate procedure model and the model of technical systems build the so called SmArtSys that provides measures to control uncertainty in early design phases.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die grundsätzliche, der Unsicherheit inhärente, Problematik wird anhand der Äußerungen eines Experten für Brückenbau gegenüber dem schwäbischen Ingenieur *Max Eyth*<sup>1</sup> über die Auslegung der *Tay Brücke* in Schottland deutlich, bei der erstmals Grauguß als Konstruktionswerkstoff für Brückenpfeiler eingesetzt wurde und die am 28.12.1878 einstürzte.<sup>2</sup>

Die Festigkeitsfrage, die Kostenberechnung überließ er mir [...] und ich habe ehrlich gerechnet und manche lange Nacht lang durchgesessen, um mir selber über der Sache völlig klar zu werden. Aber schließlich beruht doch alles mögliche auf Annahmen, auf Theorien, die noch kein Mensch völlig durchschaut und die vielleicht in zehn Jahren wie ein Kartenhaus zusammenfallen. [...] Weißt du wie es einem Block Gußeisen zumute ist, ehe er bricht, wie und warum in seinem innern die Kristalle aneinander hängen; ob ein hohles Rohr, das du biegst, auf der einen Seite zuerst reißt oder auf der anderen vorher zusammenknickt, ehe es in Stücken am Boden liegt? [...]

In den letzten Tagen in denen die Berechnungen zum Abschluß kamen, auf denen das Brückenprojekt aufgebaut ist, hatte ich noch einen lebhaften Kampf mit mir selber. Welchem Sicherheitskoeffizient darf ich trauen?

Ingenieure müssen seit jeher mit dem Umstand umgehen, dass Informationen nicht vollständig verfügbar, Szenarien oder Zusammenhänge nicht vollständig bekannt sind. Seit jeher wird als Mittel zur Überbrückung dieser Unsicherheit mit Sicherheitskoeffizienten<sup>3</sup> gearbeitet. Dabei wird ein technisches System bewusst überdimensioniert, in der Hoffnung damit die Einflüsse aller unbekannten, bzw. bewusst und unbewusst unberücksichtigten Faktoren abzudecken. Überdimensionierung steht jedoch im Zielkonflikt mit anderen Forderungen an das technische System. Kosten stehen in direktem Zusammenhang mit der Menge der eingesetzten Materialien, in der Produktion aber teilweise auch in der Nutzungsphase. Hinzu kommt die gesellschaftliche Forderung nach der Schonung endlicher Ressourcen.<sup>4</sup> Es gibt also gute Gründe Überdimensionierung zu vermeiden bzw.

---

<sup>1</sup>*Eduard Friedrich Maximilian Eyth*, seit 1896 *Max von Eyth*, (\* 6. Mai 1836 in Kirchheim unter Teck; † 25. August 1906 in Ulm) war ein deutscher Ingenieur und Schriftsteller.

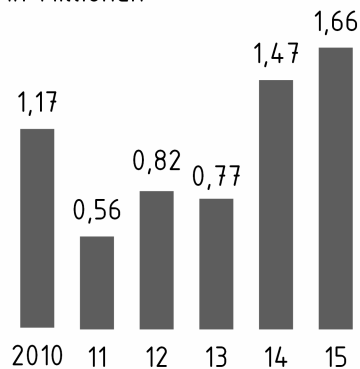
<sup>2</sup>Vgl. EYTH (1917), S. 472-474.

<sup>3</sup>Streng genommen müsste der Terminus *Unsicherheitskoeffizient* lauten.

<sup>4</sup>Vgl. HANSELKA und PLATZ (2010).

auf ein Mindestmaß zu beschränken. Allerdings sind die Folgen von Unsicherheit häufig sehr schwerwiegend für technische Systeme, Umwelt und Menschen. In der jüngeren Vergangenheit lassen sich viele Beispiele für die katastrophale Auswirkung von Unsicherheit finden. Das *Challenger Unglück* bspw. hatte seine Ursache im ungünstigen Einsatz einer *O-Ring Dichtung*.<sup>5</sup> Auch in Bezug auf Kosten, oder Imageverluste kann Unsicherheit er-

Zurückgerufene Fahrzeuge in Deutschland  
in Millionen



Quelle: Kraftfahrtbundesamt (KBA)

Abbildung 1.1: Zeitliche Entwicklung zurückgerufener Fahrzeuge in der Automobilbranche in Deutschland zwischen 2010 und 2015.<sup>6</sup>

hebliche Sprengkraft entfalten. In der Automobilindustrie führt Unsicherheit regelmäßig zu Rückrufaktionen. So hat sich nach Informationen des *Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA)* die Zahl der Rückrufe in den vergangenen Jahren deutlich erhöht, vgl. Abbildung 1.1.<sup>7</sup> Ursache sind meist mechanische Komponenten. Als Gründe werden die steigende Komplexität der Technik, starke Fortpflanzung einzelner Fehler in auf Produktplattformen basierenden Fahrzeugen und sehr hoher Kostendruck angeführt. Prominente Beispiele sind fehlerhafte Airbags des Zulieferers *Takata*, defekte Zündschlösser bei *GM*<sup>8</sup>, klemmende Gaspedale bei *Toyota*, oder unter feuchtheißem Klima und Stadtverkehr ausfallende Doppelkupplungsgetriebe von *VW*. Anhand des Rückrufes von *GM* soll die Motivation für die Anfertigung der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden. Abbildung 1.2 zeigt - zur Einführung in den Fall - eine Meldung des *Time Magazin*. *GM* wurde demnach 2014 zu einer sehr hohen Schadensersatzzahlung verurteilt. Der Grund hierfür war in der Konstruktion der Zündschlösser zu finden, durch die es unter bestimmten

---

<sup>5</sup>Vgl. FRENCH (1994), S. 231.

<sup>6</sup>Quelle: Kraftfahrtbundesamt.

<sup>7</sup>Vgl. FAZ (2017), *Automobilindustrie: Millionen Rückrufe von Autos in Deutschland*.

<sup>8</sup>Vgl. EIFLER und HOWARD (2017).

<sup>9</sup>Quelle: In Anlehnung an <http://time.com/102906/gm-fine-ignition-recalls/>, abgerufen am 25.01.2018.

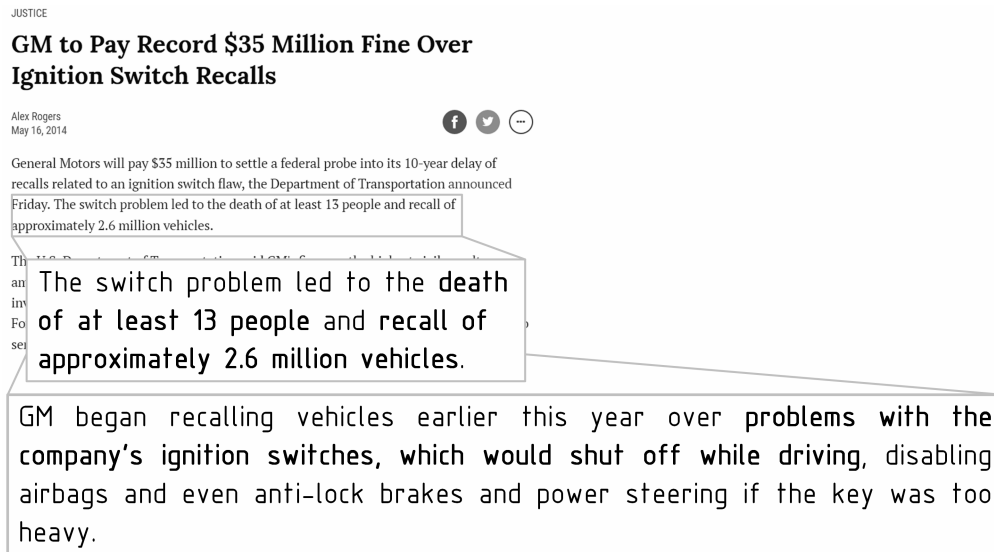


Abbildung 1.2: Meldung über den Zündschlossrückruf bei GM im *Time Magazin*.<sup>9</sup>

Umständen möglich war, das Auto während der Fahrt unbeabsichtigt auszuschalten. In der Folge funktionierten *Servolenkung*, *Bordelektronik* und die *Airbags* nicht mehr, was zu schweren Unfällen und mindestens 13 Todesopfern führte. Zur Behebung des Problems wurden etwa 2,6 Millionen Autos zurückgerufen. Um zu verstehen warum es zu dieser katastrophalen Fehlfunktion kommen konnte, muss die grundsätzliche Funktionsweise des Zündschlosses betrachtet werden, vgl. Abbildung 1.3. Durch die Drehung des Zündschlüssels im Schloss gelangt der Schlüssel in die An-Position des Autos, wo er reibkraftschlüssig gehalten wird. Die hierfür erforderliche Reibkraft  $F_R$  wird durch eine *vor-gespannte Feder* generiert. Der Zündschlüssel verfügt zur Befestigung am Schlüsselbund des Fahrers über ein Langloch. Befindet sich der Autoschlüssel im Zündschloss entsteht nun durch die Gewichtskraft der Masse des Schlüsselbundes, bzw. Trägheitskräfte bei Schlaglochdurchfahrt,  $F_G$  und der Exzentrizität der Krafteinleitung im Schlüssel  $l_1$  ein Drehmoment. Die Funktionsweise des Zündschlosses ist solange gewährleistet, wie das Drehmoment durch den Schlüsselbund das Haltemoment durch die Reibkraft  $F_R$  mit dem Hebelarm  $l_2$  nicht übersteigt.

In Untersuchungen wurde im Detail überprüft wie genau es zu dem Versagen kommen konnte. Das Ergebnis ist eine Überlagerung von Effekten, die mit *fehlender Information* und *mangelndem Schwankungsbewusstsein* zu tun haben. Die Entwickler des Zündschlosses hatten das Gesamtsystem Fahrzeug nur in Bezug auf seine Funktion und nicht in Bezug auf die Nutzungsprozesse im Blick, daher berücksichtigten sie den Zusammenhang zwischen unebenen Straßen und dem Drehen des Schlüssels nicht. Zusätzlich werden Testfahrten normalerweise mit einzelnen Zündschlüsseln ohne Schlüsselbund durchge-

<sup>10</sup>Quelle: Eigene Darstellung. Bildquelle links: EIFLER und HOWARD (2017).

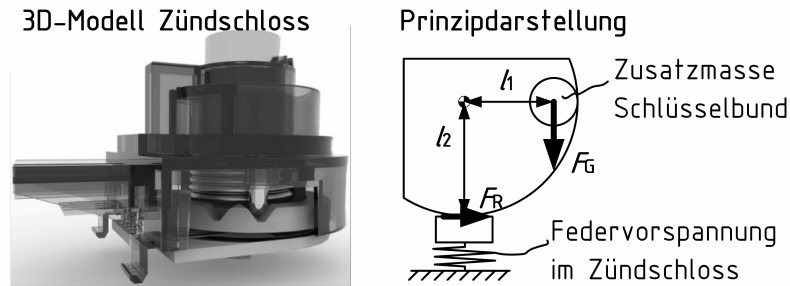


Abbildung 1.3: Modelle des Zündschlosses zur Illustration seiner Funktionsweise.<sup>10</sup>

führt, wodurch der Einfluss zusätzlicher Massen am Schlüssel bei Tests nicht auffiel. Die Federvorspannung im Zündschloss hängt von der Federsteifigkeit und dem Federweg ab. Schwankungen aus Fertigungsprozessen führen jedoch zu Schwankungen in den Geometrie- und Werkstoffeigenschaften der Feder und damit der Federsteifigkeit.<sup>11</sup> Zusätzlich entstehen durch die Fertigung Schwankungen in den *Ist-Maßen* der Bauteile, die den Federweg festlegen. Durch eine ungünstige Topologie der Bauteile wurden zusätzlich lange Toleranzketten erzeugt, die zu einer erheblichen Schwankung der Federvorspannung führten.

Der Grund für das Versagen lässt sich also auf das mangelnde *Unsicherheitsbewusstsein* der Ingenieure zurückführen. Durch ungünstige, zufällig streuende Kombinationen aus starken dynamischen Lastspitzen am Schlüsselbund und schwacher Vorspannung der Feder im Zündschloss konnte es zu der beobachteten Fehlfunktion kommen. Damit enthält das Beispiel bereits einen Anhaltspunkt zum Umgang mit Unsicherheit: Sie muss ganzheitlich über alle Lebensphasen eines technischen Produktes betrachtet werden. Dies entspricht genau dem Ansatz des *Sonderforschungsbereiches 805 (SFB 805)* an der *TU Darmstadt (TUD)*, der sich mit „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ befasst.

Das Beispiel zeigt auch, dass es durch einfache konstruktive Lösungen möglich gewesen wäre das System unempfindlich gegenüber der erwähnten Unsicherheit zu gestalten, wobei die Maßnahmen unterschiedlich wirksam sind, vgl. Abbildung 1.4. Das Versagen wird weniger wahrscheinlich, wenn die Schwankungen der Bauteile aus Fertigungsprozessen verringert werden, allerdings steigen hierdurch die Kosten stark an. Ebenso wirkt eine geschickte Anordnung der Bauteile, so dass Toleranzen sich nicht addieren können. Auch eine grundsätzliche Erhöhung der Vorspannkraft führt, bei ansonsten gleich bleibenden Schwankungen, zu einem höheren zulässigen Schlüsseldrehmoment. Die Untersuchung des Falls zeigt, dass die Ingenieure bei *GM* bereits 2004 über das Problem Bescheid wussten und sich entschlossen es durch die Erhöhung der Vorspannkraft zu beheben. Es gibt jedoch noch weitere Lösungsmöglichkeiten. Streng systematisch betrachtet kann auch die Reduktion bzw. Vermeidung des Schlüsseldrehmoments das Versagen verhindern, vgl.

<sup>11</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 269.

Federvorspannung im Zündschloss sicherstellen

$$F_{Rl} > F_{Gl}$$

Drehmoment durch Schlüsselbund verhindern.

- Fertigungsqualität erhöhen
- Toleranzketten reduzieren
- Vorspannung erhöhen
- Zusatzmasse am Schlüssel untersagen
- Nutzung auf unebener Fahrbahn untersagen
- Hebelarm  $l_1$  entfernen

Abbildung 1.4: Abhilfemaßnahmen zum Umgang mit Schwankungen am Beispiel des Zündschlosses.

Abbildung 1.4. Die beiden Möglichkeiten sind hierbei die *Reduktion der Trägheits- und Gewichtskräfte* des Schlüsselbundes einerseits und die *Reduktion des Hebelarmes  $l_1$*  andererseits. Die Reduktion der Trägheitskräfte ist nur durch eine Nutzungseinschränkung im Nutzungsprozess zu bewirken, die sich als nicht praktikabel erweist. Ebenso könnte eine fehlende Befestigungsmöglichkeit verhindern, dass der Autoschlüssel am Schlüsselbund getragen wird, was ebenfalls keine gute Lösung darstellt. Die Alternative ist die *Vermeidung des Hebelarmes  $l_1$* , was sich als wirkungsvolle und einfache Maßnahme erweist. Das Auto kann ohne Einschränkungen gefahren werden, der Autoschlüssel am Schlüsselbund getragen werden, die Fertigungsprozesse müssen nicht umgestellt werden.

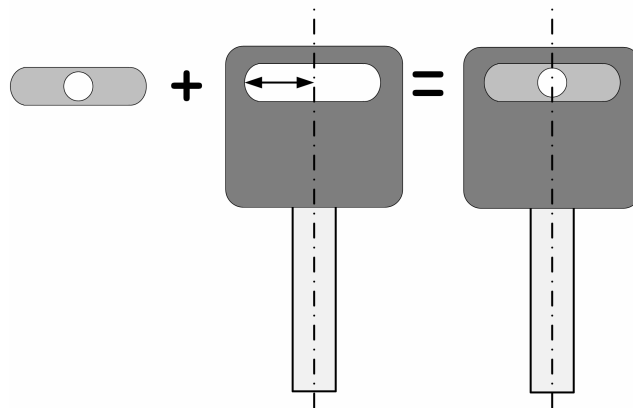


Abbildung 1.5: Kunststoffeinsatz zur Eliminierung der Exzentrizität des Lastangriffes am Autoschlüssel.<sup>12</sup>

Abbildung 1.5 zeigt die finale Lösung zur Behebung des Problems auf Basis der Eliminierung des Hebelarmes.<sup>13</sup> Ein kleiner Kunststoffeinsatz mit mittiger Bohrung wird in das Langloch der Autoschlüssel eingesetzt. Durch die Anordnung des Loches zur Befestigung am Schlüsselbund auf der Mittelachse des Schlüssels, wird kein Drehmoment

<sup>12</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EIFLER und HOWARD (2017), S.14.

<sup>13</sup>Vgl. EIFLER und HOWARD (2017), S.14.

mehr erzeugt, egal wie hoch die Last ausfällt. Das so entstandene System ist nun robust gegenüber Schwankungen aus der Fertigung und der Nutzung.

Was im Nachhinein sehr einfach aussieht und offensichtlich erscheint, stellt im Konstruktionsalltag jedoch eine erhebliche Herausforderung dar. Es stellt sich die Frage wie Entwickler methodisch unterstützt werden können, damit sie möglichst früh in der Entwicklung und mit möglichst wenigen Iterationsschleifen robuste technische Systeme entwickeln können. Es müssen also geeignete *Modelle*, *Vorgehensweisen* und *Hilfsmittel* gefunden werden, um die Entwicklung robuster technischer Systeme zu unterstützen. Die vorliegende Arbeit leistet hier einen Beitrag, indem Konstruktionshinweise auf die Anwendung im Robust Design übertragen werden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der gesamten Arbeit ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

In Kapitel 2 *Stand der Forschung* werden die für die vorliegende Arbeit grundlegenden Informationen zur Verfügung gestellt, die sich im Wesentlichen in zwei Bereiche einteilen lassen: *Grundlagen der Konstruktionsmethodik* mit der Beschreibung der zentralen Begriffe rund um *Modelle*, *Methoden*, *Systeme*, *Prozesse* und *Vorgehensmodelle*, sowie dem Einsatz von *Konstruktionshinweisen* in der Produktentwicklung (PE). Andererseits Grundlagen zum Thema *Unsicherheit* und der *Beherrschung von Unsicherheit* mit den *zentralen Begriffen*, dem Verständnis von *Unsicherheit*, *Robust Design* und dem Stand der Forschung zum Thema *Nutzung von Konstruktionshinweisen im Robust Design*.

In Kapitel 3 *Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit* werden die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung über den Forschungsbedarf in die Zielsetzung der Arbeit überführt. Dabei werden drei Kernziele der Arbeit definiert: Die Entwicklung eines Modells technischer Systeme, die Entwicklung eines Vorgehensmodells und die Ableitung eines Kataloges mit Konstruktionshinweisen zur Verwendung im Robust Design.

In Kapitel 4 *Erarbeiten der zentralen Modelle* werden die theoretischen Grundlagen der Arbeit hergeleitet. Dies reicht von der unsicherheitsspezifischen Modellierung technischer Systeme und deren formalisierter Beschreibung mit Eigenschaften bis hin zur systematisierten Analyse der möglichen Wirkungsweisen von Robust Design Maßnahmen. Diese beiden Modelle bilden die Grundlage für die Untersuchung der Eignung von Konstruktionshinweisen zur Entwicklung robuster technischer Systeme. Zusätzlich wird aus den existierenden Vorgehensmodellen das Vorgehensmodell für die *SmArtSys* abgeleitet.

Kapitel 5 *Konstruktionshinweise zur Entwicklung robuster Systeme* behandelt die Literaturrecherche zur Identifikation von Konstruktionshinweisen. Die gefundenen Hinweise werden gegliedert und nach der Systematik der Wirksamkeit im Robust Design eingestuft. Die RD-tauglichen Konstruktionshinweise werden im sogenannten *RopEx-Katalog*<sup>14</sup> dokumentiert.

---

<sup>14</sup>*RopEx*: Robustus per Experientiam



Kapitel 6 RopEx-Katalog: *Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen* stellt ausgewählte Inhalte des RopEx-Kataloges für die Unterstützung von Produktionsprozessen vor. Aus Platzgründen befinden sich weitere Konstruktionshinweise in Anhang B.

Kapitel 7 RopEx-Katalog: *Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen* stellt ausgewählte Inhalte des RopEx-Kataloges für die Unterstützung von Nutzungsprozessen vor. Aus Platzgründen befinden sich weitere Konstruktionshinweise in Anhang C.

Kapitel 8 *Evaluation der SmArtSys anhand einer industriellen Anwendung* illustriert die Anwendung der *SmArtSys* an einem komplexen technischen System und dient zusätzlich als Evaluation für die Wirksamkeit der Methode.

Kapitel 9 *Zusammenfassung und Ausblick* fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und reflektiert den Grad der Zielerreichung. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf weitere Forschungstätigkeiten.

|   |   |
|---|---|
| 1 | Einleitung  |
| 2 | <b>Stand der Forschung</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Konstruktionsmethodik<br/>(zentrale Begriffe, Theorie technischer Systeme, Theorie der Konstruktionsprozesse)</li><li>• Unsicherheit<br/>(zentrale Begriffe, Robust Design)</li></ul>  |
| 3 | Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit   |
| 4 | <b>Erarbeiten der zentralen Modelle</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Modell technischer Systeme</li><li>• RD-Wirkungsweisen</li><li>• Vorgehensmodell <i>SmArtSys</i></li></ul>  |
| 5 | <b>Konstruktionshinweise zur Entwicklung robuster Systeme</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Sammeln von Konstruktionshinweisen</li><li>• Gliedern von Konstruktionshinweisen</li><li>• Einstufen von Konstruktionshinweisen</li></ul>   |
| 6 | <b>RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Prinzipien, Bauweisen, Richtlinien (Ausschnitte) für die Fertigung</li><li>• Prinzipien für die Montage</li></ul>   |
| 7 | <b>RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Grundregeln, Prinzipien, Richtlinien für funktionale Zusammenhänge (Ausschnitte)</li><li>• Prinzipien, Richtlinien für den Umgang mit Störgrößen (Ausschnitte)</li></ul> |
| 8 | <b>Evaluation der <i>SmArtSys</i> anhand einer industriellen Anwendung</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Anwendungsbeispiel handgeführte Autogenbrennschneidemaschine</li></ul>   |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick  |
|   | Anhang  |

Abbildung 1.6: Aufbau der Arbeit.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Grundlagen der Konstruktionsmethodik

FELDHUSEN ET AL., S. 9 definieren die Begriffe *Konstruktionswissenschaft* und *Konstruktionsmethodik* für den internationalen Sprachgebrauch wie folgt:

*Design science* uses scientific methods to analyse the structures of technical systems and their relationships with the environment. The aim is to derive rules for the development of these systems from the system elements and their relationships.

*Design methodology*, however, is a concrete course of action for the design of technical systems that derives its knowledge from design science and cognitive psychology, and from practical experience in different domains. It includes plans of action that link working steps and design phases according to content and organisation. These plans must be adapted in a flexible manner to the specific task at hand [...]. It also includes strategies, rules and principles to achieve general and specific goals [...] as well as methods to solve individual design problems or partial tasks [...].

Zur Anwendung der *Konstruktionsmethodik* werden also *Modelle*, *Methoden* und *Hilfsmittel* benötigt.<sup>1</sup>

Die wesentlichen Grundlagen hierzu werden im Folgenden vorgestellt. Sie bilden das Fundament für das Verständnis des Zusammenwirkens technischer Systeme in gewollten und ungewollten Prozessen entlang der Prozessketten des Produktlebenslaufes. Zusätzlich wird ein fundamentales Verständnis von systematischer Produktentwicklung durch Vorstellung der grundlegenden Vorgehensweisen ermöglicht.

#### 2.1.1 Grundlagen zu Modellen und Methoden

*Modelle* finden in der Produktentwicklung in vielfältiger Form Verwendung. Beispielsweise werden verschiedene Eigenschaften eines Produkts mit Hilfe unterschiedlicher Modelle wiedergegeben: die Geometrie über Zeichnungen, die Festigkeit über entsprechende Werkstoffgesetze und so weiter (usw.).<sup>2</sup> Dabei stellen Modelle stets eine abstrahierte

---

<sup>1</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 694.

<sup>2</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 12.

Darstellung des Originals dar<sup>3</sup>, die zweckorientiert vereinfacht ist und bestimmte Rückschlüsse auf das Original zulässt.<sup>4</sup>

EHRENSPIEL, S. 18ff. betont zusätzlich die Reduktion der Komplexität des Originals, indem im Modell für die jeweilige Betrachtung (Zweck) das Wesentliche vom Unwesentlichen getrennt und damit ein unübersichtlicher Gegenstand bearbeitbar wird.

STACHOWIAK, S. 131-133 weist Modellen drei charakterisierende Merkmale zu:

- *Abbildungsmerkmal*  
Modelle sind Repräsentationen von Originalen (die auch wieder Modelle sein können).
- *Verkürzungsmerkmal*  
Modelle erfassen nur die von den Modellerschaffern als relevant erachteten Attribute.
- *Pragmatisches Merkmal*  
Modelle erfüllen ihre Funktion für bestimmte modellnutzende Subjekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle unter Einschränkung auf bestimmte Operationen.

GRAMLICH, S. 163 überführt die verschiedenen Betrachtungsweisen aus der Literatur in Definition 2.1.1.

### **Definition 2.1.1.: Modell**

Modelle sind vereinfachte, abstrahierte Abbilder, Darstellungen oder gedankliche oder stoffliche Gebilde der komplexen Realität. Ein Modell ist ein dem Zweck entsprechender Repräsentant des Originals. Modelle sind im Wesentlichen durch ihr Abbildungs-, Verkürzungs- und Pragmatismusmerkmal gekennzeichnet.

Vgl. GRAMLICH (2013), S. 163

□

Der Begriff der *Methode* ist einerseits im Sprachgebrauch allgegenwärtig, andererseits ist die Verwendung des Begriffs hierbei inhaltlich sehr weit gefächert.<sup>5</sup> Hierdurch ist bspw. in der Zusammenarbeit interdisziplinärer Teams<sup>6</sup> die Ableitung eines gemeinsamen Verständnisses vonnöten um Missverständnisse zu vermeiden.

Die VDI 2223, S. 88 versteht unter einer Methode „ein planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“, wobei das Vorgehen regelbasiert ist und nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind.<sup>7</sup>

Definition 2.1.2 fasst das Verständnis von Methoden in dieser Arbeit zusammen.

---

<sup>3</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 41.

<sup>4</sup>Vgl. LINDEMANN (2009), S. 333.

<sup>5</sup>Vgl. LINDEMANN (2009), S. 57.

<sup>6</sup>Wie bspw. im *SFB 805*.

<sup>7</sup>Vgl. LINDEMANN (2009), S. 333.

### Definition 2.1.2.: Methode

Eine Methode kennzeichnet die Beschreibung eines planmäßigen, regelbasierten Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Methoden sind somit als Denk- und Handlungsempfehlungen zu verstehen. Sie beschreiben die Art und Weise, wie und mit welchem Ergebnis Arbeitsschritte durchzuführen sind.

Vgl. GRAMLICH (2013), S. 163

□

Auch der Begriff der *Methodik* wird stark unterschiedlich verwendet. Auf Basis der Ausführungen von LINDEMANN, S. 333 und der VDI RICHTLINIE 2223, S.88 wird im Rahmen dieser Arbeit Definition 2.1.3 verwendet.

### Definition 2.1.3.: Methodik

Eine Methodik stellt ein planmäßiges Vorgehen unter Anwendung verschiedener Einzelmethode dar.

□

Damit Methoden zur Erreichung bestimmter Ziele in der Entwicklung eingesetzt werden können bedarf es der Verwendung von Modellen. Vorgehensmodelle beschreiben bspw. die zu einem bestimmten Zweck auszuführenden Arbeitsschritte (*Was soll getan werden?*). Ein reines Vorgehen alleine reicht jedoch zur Zielerreichung nicht aus. Zusätzlich finden Modelle Verwendung um das *Wie wird das Ziel erreicht?* zu unterstützen, vgl. hierzu Abbildung ?? . Modelle und Vorgehensweise müssen daher zueinander passen. Des Weiteren können zur Unterstützung weitere *Hilfsmittel*, *Instrumente*<sup>8</sup>, oder *Werkzeuge*<sup>9</sup> eingesetzt werden, um das Vorgehen zum Anwenden einer Methode zu unterstützen. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Konstruktionshinweise sind ein solches Hilfsmittel.

## 2.1.2 Theorie technischer Systeme

Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit dem Thema *Modellierung technischer Systeme*, schließlich haben Entwicklungsprozesse letztlich technische Produkte zum Ziel.<sup>10</sup> Ausgehend vom *allgemeinen Systembegriff* wird das *Verständnis technischer Systeme* hergeleitet. Für die in der Entwicklung zweckdienliche Beschreibung technischer Systeme werden *Eigenschaften* verwendet. Daher wird dieser Abschnitt um die Vorstellung grundlegender *eigenschaftstheoretischer Überlegungen* ergänzt.

Ein *System* besteht aus einer endlichen Menge von Elementen, die nach bestimmten Regeln geordnet sind. Die Elemente eines Systems sind dabei durch Beziehungen miteinander verknüpft.<sup>11</sup> Zusätzlich wird das System durch eine Systemgrenze von der

---

<sup>8</sup>Vgl. VDI 2223 (2004), S. 88.

<sup>9</sup>Vgl. LINDEMANN (2009), S. 337.

<sup>10</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 244.

<sup>11</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 11.

Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung.<sup>12</sup>

ROPOHL, S. 75 hebt hervor, dass drei unterschiedliche Sichtweisen auf Systeme bestehen, die jeweils einen wesentlichen Aspekt eines Systems betonen bzw. in den Vordergrund der Betrachtung rücken, vgl. hierzu das Verkürzungsmerkmal nach STACHOWIAK, S. 131-133. Er unterscheidet in

- *funktionales Konzept*,
- *struktureles Konzept* und
- *hierarchisches Konzept*.

Abbildung 2.1 zeigt die verschiedenen Konzepte im Vergleich. Das *funktionale Konzept* stellt den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems in den Vordergrund, wobei die Art und Weise dieses Zusammenhangs durch die das System charakterisierenden Eigenschaften gegeben ist. Hierbei wird das System als *Blackbox* aufgefasst, die Eigenschaften sind also diejenigen Eigenschaften die von außen wahrnehmbar sind.<sup>13</sup> Das funktionale Systemdenken sieht also bewusst von der materiellen Konkretisierung und vom inneren Aufbau des Systems ab und beschränkt sich auf das Verhalten einer Ganzheit in ihrer Umgebung.<sup>14</sup> Als Beispiel kann der vom Fahrer wahrnehmbare Zusammenhang zwischen dem Betätigen des Gaspedals und der resultierenden Geschwindigkeitsänderung seines Fahrzeuges genannt werden.

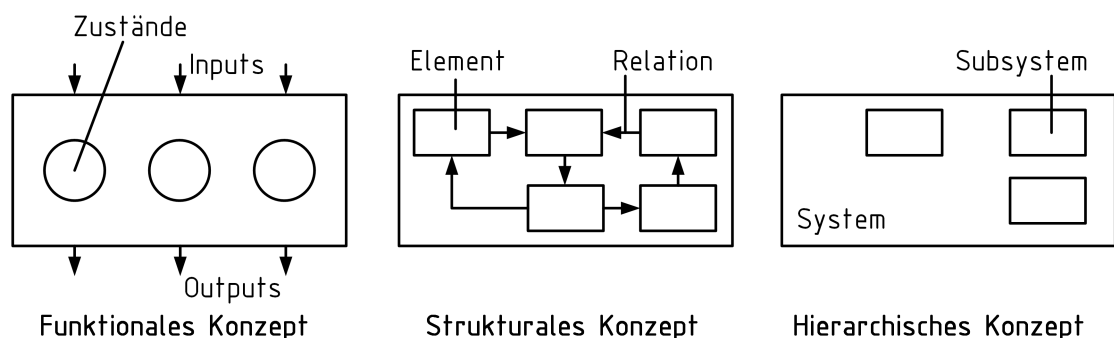


Abbildung 2.1: Funktionales, struktureles und hierarchisches Konzept zur Modellierung von Systemen.<sup>15</sup>

Das *strukturele Konzept* begreift das System als eine Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente. Entsprechend stehen beim strukturalen Konzept zum einen die Vielfalt der Interdependenzen zwischen den Elementen und zum anderen die Beschaffenheit der Elemente selber im Mittelpunkt des Interesses, die je nach Ausprägung zu unterschiedlichen

<sup>12</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 19.

<sup>13</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 75.

<sup>14</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 76.

<sup>15</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach ROPOHL (2009), S. 76.

Gesamtsystemeigenschaften führen können. Dem Grundsatz des strukturalen Denkens folgend, müssen Elemente immer im Kontext der Abhängigkeit von anderen Elementen betrachtet werden.<sup>16</sup>

Das *hierarchische Konzept* hebt den Umstand, dass die Teile eines Systems wiederum als Systeme, das System selbst aber seinerseits als Teil eines umfassenderen Systems angesehen werden können, hervor. Entsprechend hängt es von der gerade betrachteten Stufe ab, ob eine Ganzheit (System) entweder ein Teil einer nächsthöheren Ganzheit (Supersystem), oder aber ein Teil des Systems gleichzeitig eine Ganzheit der nächstniedrigeren Stufe (Subsystem) bildet.<sup>17</sup> Eine Systembetrachtung kann also auf verschiedenen Detaillierungsebenen stattfinden, wobei die Ebenen voneinander abhängig sind. Entsprechend kann der Systemgedanke zur tiefen detaillierten Analyse ebenso eingesetzt werden wie um immer weiter greifende Synthese von Zusammenhängen zu betreiben.<sup>18</sup> Die Grenze des zu betrachtenden Systems wird also durch den Zweck der Modellbildung bestimmt.<sup>19</sup>

In der Literatur werden Systeme nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifiziert.<sup>20</sup> Für diese Arbeit ist jedoch vor allem das sog. *technische System* relevant.<sup>21</sup> Technische Systeme genügen dem oben vorgestellten Systembegriff.<sup>22</sup> Sie sind künstlich erzeugte, geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck erfüllen und zu diesem entwickelt werden.<sup>23</sup> Das technische Gebilde ermöglicht also mit seiner Funktion die Durchführung einer Operation (Zweck). Wird vor allem das geometrisch-stoffliche Gebilde und die von ihm realisierte Funktion betrachtet, so spricht man von einem *technischen Produkt*.<sup>24</sup>

Technische Gebilde können also als Systeme aufgefasst werden, die durch Eingangsgrößen (Inputs) und Ausgangsgrößen (Outputs) mit ihrer Umgebung in Verbindung stehen, vgl. Abbildung 2.2.<sup>26</sup> Damit wird das funktionale Konzept aufgegriffen. Die Systemgrenze legt die Zugehörigkeit zum technischen System fest. Ein technisches System kann in Teilsysteme untergliedert werden, was den hierarchischen Systemaspekt aufgreift und eine zweckmäßige Modellierung technischer Systeme auf dem jeweils benötigten Abstraktionslevel ermöglicht.<sup>27</sup> Zusätzlich findet sich das strukturelle Konzept in Form von

---

<sup>16</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 75.

<sup>17</sup>Vgl. hierzu auch VDI 2206 (2004), S. 13.

<sup>18</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 77, oder auch HUBKA (1984), S. 11.

<sup>19</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 21.

<sup>20</sup>Vgl. bspw. EHRENSPIEL (2009), S. 22 f., oder HUBKA (1984), S. 5.

<sup>21</sup>Der von EHRENSPIEL (2009), S.24 vorgestellte Begriff des *Sachsystems* ist analog zum technischen System zu verstehen.

<sup>22</sup>Vgl. bspw. GROTE und FELDUSEN (2014), S. F1.

<sup>23</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 25.

<sup>24</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 26.

<sup>25</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach HUBKA (1984), S. 15, HUBKA und EDER (1992), S. 90, HUBKA und EDER (1988), S. 58.

<sup>26</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 41.

<sup>27</sup>Vgl. FELDUSEN ET AL. (2013), S. 238.

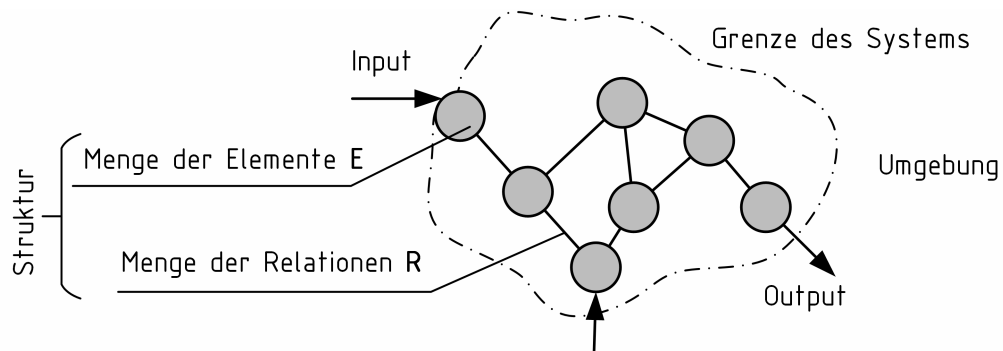


Abbildung 2.2: Modell technischer Systeme.<sup>25</sup>

geordneten und verknüpften, durch Eigenschaften beschriebenen Systemelementen wieder.<sup>28</sup>

### Formalisierte Beschreibung von Systemen mittels Eigenschaften

Die sogenannte *Eigenschaftstheorie* ist Teil der *Theorie technischer Systeme*.<sup>29</sup> Der Zusammenhang lässt sich über die Betrachtung des Zwecks des technischen Systems herstellen. Wie oben aufgezeigt werden technische Systeme entwickelt, hergestellt und genutzt, um mit ihrer Funktion einen Zweck zu erfüllen (eine Operation auszuführen). Damit ist das Erzeugen bestimmter Eigenschaften technischer Gebilde Ziel des Entwickelns. Auch HUBKA, S. 98 hält fest: „Das Wichtigste am Maschinensystem [sind] die gewünschten Eigenschaften [...]; das Maschinensystem ist ja nur Träger der benötigten Funktion.“

Die Beschreibung eines Systems erfolgt durch Angabe seiner Eigenschaften. Die Fülle an Eigenschaften, die ein System beschreiben, ermöglichen dementsprechend seine Identifikation.<sup>30</sup> EHRENSPIEL (2009), S. 28 hält fest, dass eine Eigenschaft alles ist, was durch Beobachtungen, Messergebnisse, allgemein akzeptierte Aussagen von einem Gegenstand festgestellt werden kann. Eigenschaften charakterisieren also Objekte.<sup>31</sup> Laut DUDEN ist eine Eigenschaft ein „zum Wesen einer Sache gehörendes Merkmal“, wobei der Begriff Merkmal als „charakteristisches, unterscheidendes Zeichen, an dem eine bestimmte Person, Gruppe oder Sache, auch ein Zustand erkennbar wird“ definiert ist. Auch in der Eigenschaftstheorie sind die Begriffe *Eigenschaft* und *Merkmal* eng miteinander verknüpft. So wird im Allgemeinen eine *Eigenschaft* als eine charakterisierendes *Merkmal* und ein zugehöriger *Wert* (oder auch Ausprägung) verstanden.<sup>32,33</sup> Dieses

<sup>28</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 19.

<sup>29</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 15.

<sup>30</sup>Vgl. BIRKHOFFER (1980), S. 5.

<sup>31</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 14.

<sup>32</sup>Vgl. BIRKHOFFER (1980), S. 6.

<sup>33</sup>Diese Einteilung ist in der Literatur nicht durchgängig. Beispielsweise verwendet EHRENSPIEL, S. 28 die Begriffe Eigenschaft und Merkmal synonym.



Grundverständnis ermöglicht neben der Identifikation (siehe oben) auch die Abgrenzung bzw. Unterscheidung von technischen Systemen mit Hilfe von Eigenschaften. Nach WÄLDELE, S. 17 können drei verschiedene Stufen der Ähnlichkeit zwischen Objekten unterschieden werden:

- Gleiche Objekte haben gleiche Eigenschaften,
- Ähnliche Objekte haben gleiche Merkmale, aber unterschiedliche Werte,
- Unterschiedliche Objekte haben unterschiedliche Merkmale.

Ein VW Käfer Baujahr 1967 und ein VW Golf Baujahr 2011 sind gleich in Bezug auf den Einsatz eines Verbrennungsmotors, ähnlich in Bezug auf die Motorleistung und unterschiedlich in Bezug auf Airbags und Katalysator. Die Granularität der Betrachtung hat also einen Einfluss auf die Beurteilung von Ähnlichkeit.

Eigenschaften ermöglichen das Beschreiben von Systemen, allerdings führt dies sehr schnell zu einer unüberschaubaren Vielzahl von Eigenschaften. Aus diesem Grund existieren in der Literatur eine Vielzahl von Kategorisierungsansätzen für Eigenschaften. An dieser Stelle werden lediglich die für die Arbeit im Bereich der Unsicherheit als relevant erachteten Kategorisierungen vorgestellt.

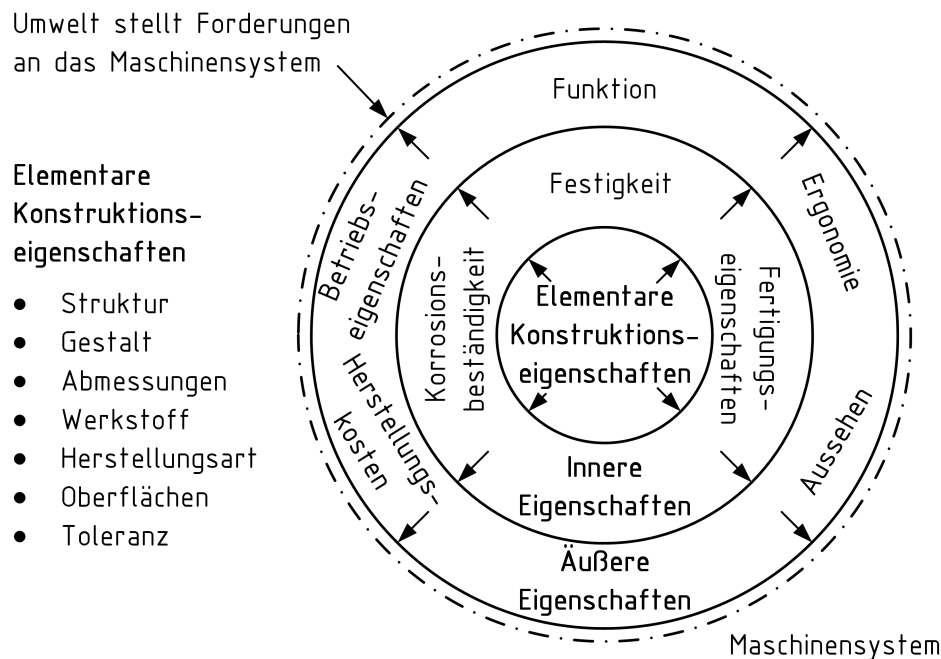


Abbildung 2.3: Kategorisierung von Eigenschaften technischer Systeme nach Hubka.<sup>34</sup>

<sup>34</sup>Quelle: Eigene, grafisch angepasste Darstellung nach HUBKA (1984), S. 134.

Abbildung 2.3 zeigt einen Teil der sehr weit gefassten und umfänglich dokumentierten Ausführung von HUBKA. Er unterscheidet nach Art der Feststellung in äußere und innere Eigenschaften<sup>35</sup>, wobei die äußeren Eigenschaften durch den Kunden bzw. Nutzer wahrnehmbar sind, während die inneren Eigenschaften das innere Gefüge des Systems beschreiben - entspricht dem oben vorgestellten funktionellen und dem strukturalen Systemkonzept<sup>36</sup> von ROPOHL. Gleichzeitig ergeben sich die äußeren Eigenschaften durch die inneren Eigenschaften des Systems. Die Funktion eines Systems ist also eine abhängige Eigenschaft, die sich aus unabhängig veränderlichen Eigenschaften ergibt.<sup>37</sup> Diese für die Funktion wesentlichen Eigenschaften nennt HUBKA *Parameter*.<sup>38</sup>

Als für den Konstruktionsprozess besonders relevant erachtet HUBKA die sogenannten Konstruktionseigenschaften. Unter diesen Eigenschaften vereint er all diejenigen inneren Eigenschaften, die dem Konstrukteur bei der Erschaffung der gewünschten äußeren Eigenschaften als Mittel dienen.<sup>39,40</sup> Eine besondere Gruppe innerhalb der Konstruktionseigenschaften stellen die sog. *elementaren Konstruktionseigenschaften* dar, vgl. Abbildung 2.3. Jede der Konstruktionseigenschaften und damit letztlich jede äußere Eigenschaft kann auf eine Kombination der elementaren Eigenschaften zurückgeführt werden.<sup>41</sup> Beispielsweise ist die Konstruktionseigenschaft *Steifigkeit* vom *Werkstoff*, der *Gestalt* und den *Abmessungen* abhängig, die die Steifigkeit festlegen.<sup>42</sup> Wenn sich auch die Begrifflichkeiten teilweise deutlich unterscheiden, findet sich die Unterscheidung in direkt vom Konstrukteur festlegbare Eigenschaften und sich daraus ergebenden Eigenschaften in vielen konstruktionswissenschaftlichen Werken wieder. Beispielsweise sprechen sowohl LINDEMANN (2009) als auch EHRENSPIEL (2009) in Anlehnung an die DIN 2330 (2013) von sogenannten *Beschaffenheitsmerkmalen*, die vom Entwickler *unmittelbar* festgelegt werden können. Diese kennzeichnen bspw. die *Geometrie* oder auch den *Werkstoff* eines stofflichen Objektes. Die Autoren sprechen in diesem Zusammenhang auch von *direkten Merkmalen*.<sup>43</sup>

BIRKHOFFER und WÄLDELE unterscheiden in *abhängige* und *unabhängige Eigenschaften*.<sup>44</sup> Das Ziel der Produktentwicklung ist es demnach die relevanten unabhängigen Eigenschaften derart festzulegen, dass die geforderten bzw. gewünschten wahrnehmbaren und durch den Kunden und Nutzer bewertbaren Eigenschaften möglichst erreicht

---

<sup>35</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 100.

<sup>36</sup>ROPOHL (2009), S. 76.

<sup>37</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 101.

<sup>38</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 14.

<sup>39</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 119.

<sup>40</sup>Vgl. HUBKA (1976), S. 76.

<sup>41</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 120.

<sup>42</sup>TJALVE und HUBKA (1978), S. 78 unterscheiden in *erwünschte* und *unerwünschte Eigenschaften* eines Systems, wobei diese sich jeweils durch die Kategorien *Struktur*, *Form*, *Abmessung*, *Oberfläche* und *Werkstoff* beschreiben lassen.

<sup>43</sup>Vgl. LINDEMANN (2009), S. 160, vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 28 f.

<sup>44</sup>Vgl. WÄLDELE und BIRKHOFFER (2008).

werden.<sup>45</sup> Abhängige Eigenschaften sind abhängig von der Wahl der unabhängigen Eigenschaften.<sup>46</sup> Keine abhängige Eigenschaft entsteht aus sich selbst heraus, sondern muss immer durch die geeignete Wahl der unabhängigen Eigenschaften durch den Konstrukteur festgelegt werden. Das ergibt eine Vielzahl von Relationen zwischen abhängigen und unabhängigen Eigenschaften.<sup>47</sup> Diese Relationen müssen dem Entwickler bekannt sein, um eine bestimmte Systemeigenschaft gezielt erzeugen zu können. Als Untergruppe der unabhängigen Eigenschaften führt WÄLDELE sogenannte *konstruktive Parameter* ein. Diese bezeichnen die für den Entwickler bei der Lösung einer Konstruktionsaufgabe relevanten unabhängigen Eigenschaften.<sup>48</sup>

### Beschreibung von Produkten

*Produktmodelle* oder auch *produktdarstellende Modelle* werden im Rahmen der Produktentwicklung eingesetzt. Sie repräsentieren das zu entwickelnde Produkt auf der jeweilig betrachteten Konkretisierungsstufe mittels derjenigen Systemeigenschaften, die zur Ausführung des jeweiligen Arbeitsschrittes benötigt werden.<sup>49</sup> BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 54 betonen zusätzlich den virtuellen Charakter von Produktmodellen.

Sowohl EHRENSPIEL (2009), als auch ANDREASEN und HEIN (1987) und SAUER (2006) teilen Produktmodelle in verschiedene *Partialmodelle* ein und ordnen diese den unterschiedlichen Konkretisierungsstufen während der Produktentwicklung zu. Partialmodelle definieren hierbei eine abgeschlossene Menge von Objekttypen, die eine anwendungsunabhängige Klasse von Produktmerkmalen beschreiben. Die sogenannte *Produktmodellpyramide*, vgl. Abbildung 2.4, stellt ein integriertes Produktmodell dar, wobei die verschiedenen horizontalen Ebenen der Pyramide durch die jeweiligen Partialmodelle, entsprechend der in der jeweiligen Konkretisierungsstufe abzubildenden Eigenschaften, dargestellt werden. Konkretisierungsgrad und Komplexität nehmen von oben nach unten zu. Der im Verlauf der Entwicklung immer größeren Anzahl an Lösungsmöglichkeiten und Eigenschaften trägt die Pyramidenform Rechnung. Die einzelnen Ebenen der Pyramide bauen logisch aufeinander auf, können aber jeweils einzeln bearbeitet werden. Allerdings ist die Durchgängigkeit der Information von einer Stufe zur nächsten zu gewährleisten.<sup>50</sup> EHRENSPIEL (2009), S. 37 gliedert die Produktmodellpyramide in 4 horizontale Ebenen. *Funktion* (funktionelle Lösungsmöglichkeiten), *Physik* (physikalische Lösungsmöglichkeiten) und *Gestalt* (gestalterische Lösungsmöglichkeiten) als übliche Betrachtungsweisen technischer Systeme im Maschinenbau, sowie zusätzlich den *Produktionsbereich* im Sinne einer durchgängigen Produkterstellung.

---

<sup>45</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 55.

<sup>46</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 57.

<sup>47</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 63.

<sup>48</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 62.

<sup>49</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 41, sinngemäß auch EHRENSPIEL (2009), S. 695 und LINDEMANN (2009), S. 334

<sup>50</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 28.

<sup>51</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach EHRENSPIEL (2009), S. 37.

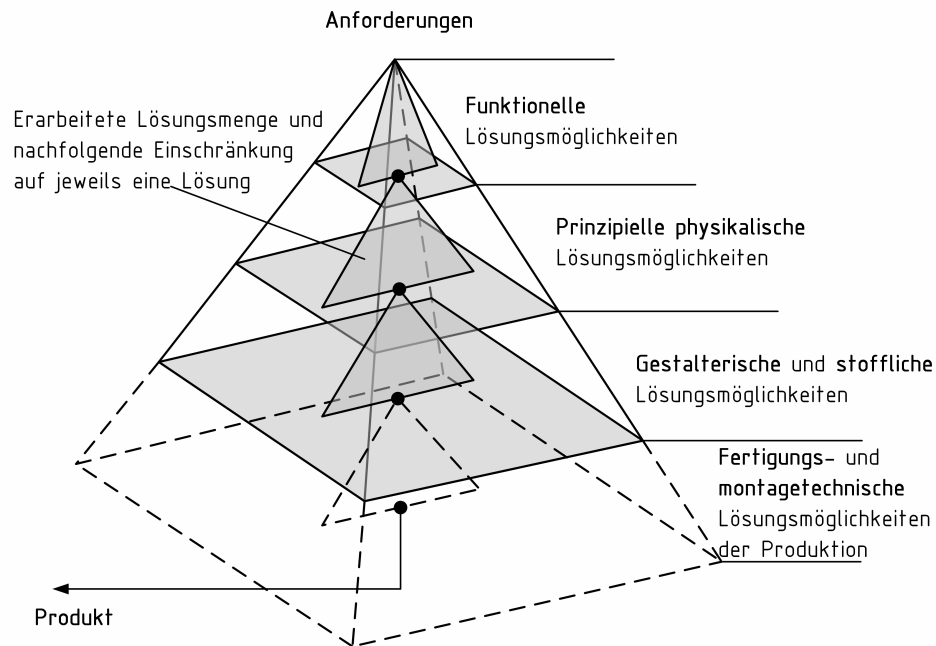


Abbildung 2.4: Produktmodellpyramide nach Ehrlenspiel.<sup>51</sup>

Auf jeder einzelnen Ebene werden zunächst Lösungsvarianten synthetisiert, was jeweils auf eine Lösungsmenge führt. Zum Übergang auf die jeweils nächste Ebene ist die Lösungsmenge durch Bewerten und Auswahl zu reduzieren, hierbei kommen Anforderungen und Randbedingungen zum Einsatz. Die Wichtigkeit der einzelnen Ebenen für eine erfolgreiche Entwicklung steigt mit dem Abstraktionsgrad an.<sup>52</sup>

SAUER (2006), S. 67 f. greift die Überlegungen von EHRENSPIEL und ANDREASEN auf, ordnet jedoch den horizontalen Ebenen der Produktmodellpyramide explizit Partialmodelle verschiedener Konkretisierungsstufen zu, vgl. Abbildung 2.5. Er unterscheidet in Modelle zur Beschreibung von *Funktionen*, *Effekten*, *Wirkstrukturen* und der *Gestalt*. Zusätzlich bringt er die Produktentwicklung über die Anforderungen mittelbar mit Prozessen in Verbindung. Mit dieser Überlegung überführt er die *integrierte Produktentwicklung* in eine *integrierte Produkt- und Prozessentwicklung*. Hierdurch wird der Zweck des Produktes in der Erfüllung von Nutzungsprozessen deutlich, vgl. hierzu Abschnitt 2.1.2. Aus der Antizipation intendierter Nutzungsprozesse abgeleitete Anforderungen bilden zusammen mit der verfahrenstechnischen Umsetzung die Ausgangssituation der Produktentwicklung. Der bei SAUER (2006) zunächst für Nutzungsprozesse formulierte Gedanke ist die Basis für die *ganzheitliche Produkt und Prozessentwicklung* (GPPE), vgl. Abschnitt 2.1.3.

<sup>52</sup>EHRENSPIEL (2009), S. 37 f.

<sup>53</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach SAUER (2006), S. 68.

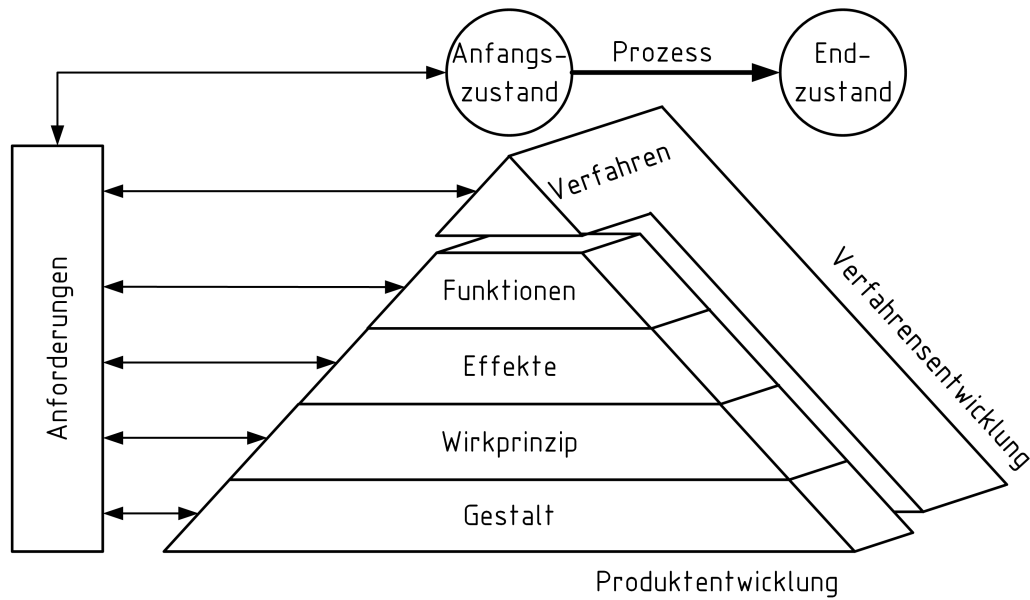


Abbildung 2.5: Produktmodellpyramide nach Sauer.<sup>53</sup>

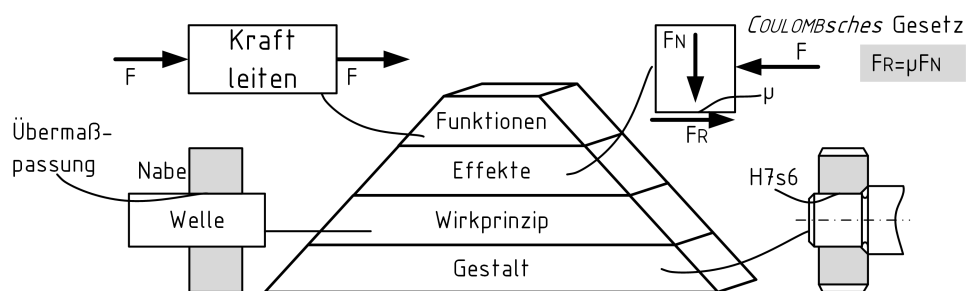


Abbildung 2.6: Produktmodelle der verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide am Beispiel einer reibkraftschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung.

Im konstruktionswissenschaftlichen und technischen Umfeld wird unter dem Begriff *Funktion* der lösungsneutral formulierte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen verstanden, vgl. Abbildung 2.6 links. Funktionsmodelle werden genutzt um die Gesamtfunktion und die wesentlichen Teilfunktionen des Produktes zu beschreiben.<sup>54</sup> Für diese Arbeit wird die *Funktion* gemäß Definition 2.1.4 verstanden.

### Definition 2.1.4.: Funktion

Die *Produktfunktion* ist eine lösungsneutrale Beschreibung als Operation des gewollten Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Als Ein- und Ausgangsgrößen können Energien, Signale und Stoffe fungieren.

Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 63

□

Zur Beschreibung von Funktionen kommen *nicht normierte Subjekt-Verb-Formulierungen*<sup>55</sup> und *normierte Funktionsbeschreibungen* (Wandeln, Umformen, Leiten, Verknüpfen, Speichern)<sup>56</sup> zum Einsatz. Die Verknüpfung verschiedener Teilfunktionen wird als Funktionsstruktur bezeichnet.<sup>57</sup>

Die Funktion spielt für das Robust Design eine besondere Rolle, da Robustheit über die Funktionserfüllung unter Unsicherheit beurteilt wird, vgl. Definition 2.2.2. Dabei rückt allerdings nicht nur der gewollte Zusammenhang von Größen in den Mittelpunkt des Interesses, sondern auch der reale, tatsächlich auftretende Zusammenhang. Diese Unterscheidung reflektieren BIRKHOFFER und KLOBERDANZ, S. 65 mit Definition 2.1.5.

### Definition 2.1.5.: Verhalten

Das *Verhalten* ist die Beschreibung eines beobachteten oder gemessenen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen beim Wirken eines realen Produktes.

Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 65

□

Auf der Ebene der physikalischen Effekte werden die zunächst lösungsneutral formulierten Funktionen durch sogenannte *physikalische Effekte* realisiert. Diese stellen elementare physikalische Erscheinungen dar, die als Gesetzmäßigkeit formuliert werden können. So beschreibt das COULOMB<sup>58</sup>sche Gesetz in Abbildung 2.6 den physikalischen Effekt der Reibung. In der Folge lässt sich das physikalische Geschehen beschreiben. Meist erfolgt dies auf Basis von relevanten physikalischen Größen, die in einen formelmäßigen Zusammenhang gebracht werden können, sowie durch eine Skizze der Anordnung.<sup>59</sup> Für den Konstrukteur ist es eine unentbehrliche Voraussetzung, dass er physikalische Effekte und deren Eigenschaften kennt und sie hinsichtlich ihrer zu erfüllenden

---

<sup>54</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 40.

<sup>55</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 63.

<sup>56</sup>Vgl. bspw. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 71.

<sup>57</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 67.

<sup>58</sup>*Charles Augustin de Coulomb* (\* 14. Juni 1736 in Angoulême; † 23. August 1806 in Paris) war ein französischer Physiker und begründete die Elektrostatik sowie die Magnetostatik.

<sup>59</sup>Vgl. PONN und LINDEMANN (2008), S. 397.

Funktion auswählen, anpassen und bewerten kann.<sup>60</sup> Zur Unterstützung dieser Schritte existieren in der Literatur gegliederte Konstruktionskataloge, die technische Funktionen und physikalische Effekte in Zusammenhang bringen.<sup>61</sup>

Physikalische Effekte werden durch *Wirkgeometrien*, *Wirkflächen* und *Wirkbewegungen* im sogenannten *Wirkprinzip* konkretisiert. Das bedeutet, dass geometrische und stoffliche Eigenschaften in Bezug auf die Funktionserfüllung präzisiert werden, vgl. Abbildung 2.6. Werden mehrere Wirkprinzipien in einem Produkt, gemäß der durch die Funktionsstruktur vorgegebenen Topologie, verknüpft spricht man von *Wirkstrukturen*.<sup>62</sup> Die Analyse und Synthese technischer Systeme unter Anwendung von Wirkstrukturen werden bspw. von MATTHIESEN (2002) und LEMBURG (2009) erläutert.<sup>63</sup>

*Gestaltmodelle* enthalten die Gesamtheit geometrisch und werkstofflich beschreibbarer Merkmale eines Produktes.<sup>64</sup> Sie werden bspw. mit Hilfe von CAD-Systemen rechnergestützt gewonnen. Im Gegensatz zum Wirkstrukturmodell bilden Gestaltmodelle das Produkt deutlich konkretisiert ab, vgl. Abbildung 2.6 rechts. Auf Basis von Gestaltmodellen werden u.A. Zusammenbauzeichnungen und Fertigungszeichnungen gewonnen. Die Partialmodelle auf den abstrakteren Ebenen der Produktmodellpyramide sind in Bezug auf die zur Modellklasse des jeweiligen Partialmodells gehörende Modellelemente deutlich weniger komplex als Gestaltmodelle. Für die verschiedenen Problemstellungen im Rahmen der Gestaltung steht eine große Vielzahl unterschiedlicher Modelle, bspw. Stücklisten, 3D-Modelle, analytische Modelle, oder numerische Modelle zur Verfügung.

### Beschreibung von Prozessen

Technische Systeme dienen der Realisierung von *Prozessen*.<sup>65</sup> Sie stellen das Mittel dar mit dem ein bestimmter Zweck erfüllt wird. Dieser Zweck ist an einen Nutzen für den Anwender gebunden.<sup>66</sup> Ein Kunde erwirbt das Produkt in der Regel nur zu dem Zweck, den gewünschten Prozess zu realisieren.<sup>67</sup> Auch ROPOHL betont den Zweck als Grund einen Prozess auszuführen, wobei zusätzliche Mittel als Werkzeuge eingesetzt werden können, um den Zweck zu erfüllen.<sup>68</sup> Der Zweck ist dabei beschrieben als der intendierte Endzustand der Transformation (Prozess) eines Operanden.<sup>69</sup> Der Begriff *Prozess* selber beschreibt eine geordnete Menge von Operationen.<sup>70</sup>

---

<sup>60</sup>Vgl. WÄLDELE (2012), S. 32.

<sup>61</sup>Unter anderen sei an dieser Stelle auf die umfassenden Arbeiten von ROTH (ROTH (1996), ROTH (2000), ROTH (2001)), oder auch ARDENNE (2005) verwiesen.

<sup>62</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 56.

<sup>63</sup>Weitere Werke, die zum Verständnis von Kopplungen in Wirkflächenpaaren beitragen, sind unter anderen FREI (2002), ERSOY (1975), BIRKHOFFER (1980), oder auch die Arbeiten von ROTH.

<sup>64</sup>Vgl. PONN und LINDEMANN (2008), S. 399.

<sup>65</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 42.

<sup>66</sup>Vgl. HEIDEMANN (2001), S. 21.

<sup>67</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 32.

<sup>68</sup>Vgl. ROPOHL (2009), S. 156.

<sup>69</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 23.

<sup>70</sup>Vgl. EHRELENSPIEL (2009), S. 26.

Zur Abbildung von Prozessen und ihrem Zusammenwirken mit Produkten in technischen Systemen existieren, in Abhängigkeit von der Aufgabe in der Entwicklung (dem Zweck des Modells), sehr viele unterschiedliche Arten von Prozessmodellen. Zur Abbildung von Geschäftsprozessen wird bspw. die sogenannte *Business Process Modelling Notation (BPMN)* verwendet.

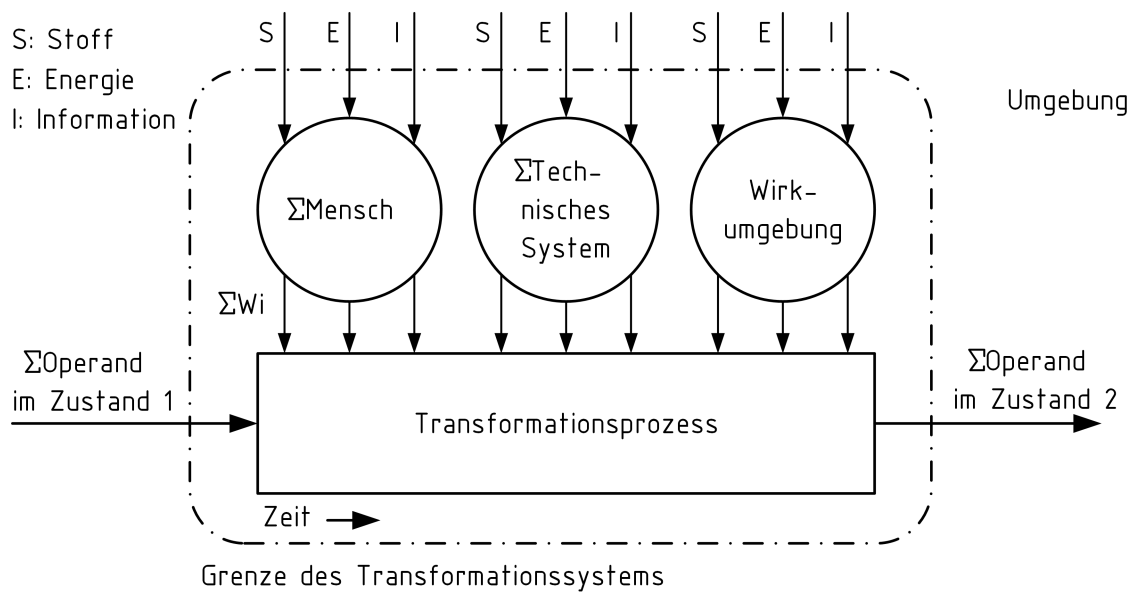


Abbildung 2.7: Modell des Transformationssystems nach Hubka.<sup>71</sup>

Zur Abbildung technischer Systeme stehen ebenfalls verschiedene Modelle zur Verfügung. Abbildung 2.7 zeigt das Modell der Transformationsprozesse nach HUBKA. Er begreift die Überführung eines Operanden (Objektes) von einem Zustand in einen nächsten als (künstlichen) Prozess. Dieser Prozess wird ermöglicht durch gezielte Wirkungen stofflicher, energetischer und informationeller Art, die jeweils von Menschen, technischen Systemen, oder der Wirkumgebung ausgehen können. Die Wirkumgebung ist dabei der jeweils relevante Teil der Umgebung. Diese Modellobjekte werden als Operatoren bezeichnet, die auch untereinander in Beziehung stehen können.<sup>72</sup>

HEIDEMANN entwickelt ein hierzu deutlich erweitertes detaillierteres Prozessmodell zur Abbildung von Nutzungsprozessen, vgl. Abbildung 2.8. Das technische Produkt (Arbeitsmittel) bildet den Operator, der mit Hilfe der Wirkgröße den Operanden in einem bestimmten Zeitintervall von einem Anfangs- in einen Endzustand transformiert. Der Endzustand des Prozesses ist der Zweck der Zustandsänderung. Prozesse werden

<sup>71</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach HUBKA (1984), S. 24.

<sup>72</sup>Vgl. HUBKA (1984), S. 23 f.

<sup>73</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 34 (grafisch und begrifflich angepasste Darstellung auf Basis des Prozessmodells von HEIDEMANN (2001), S. 76)



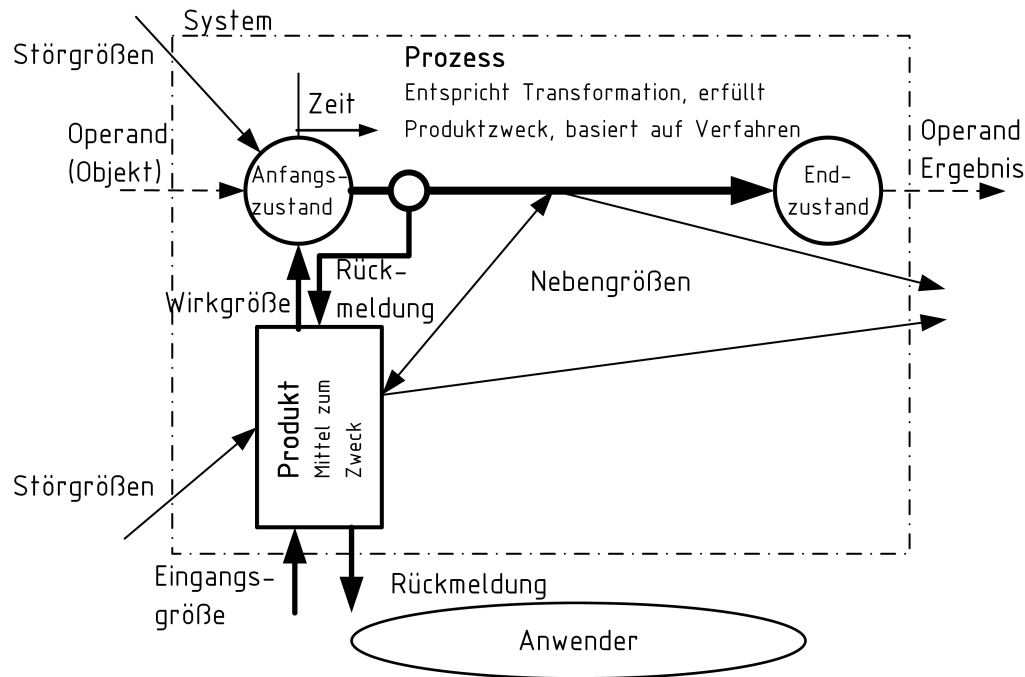


Abbildung 2.8: Detailliertes Prozessmodell nach Heidemann.<sup>73</sup>

durch Verfahren konkretisiert, wobei die Festlegung eines Verfahrens ebenfalls die zur Erzeugung der entsprechenden Wirkgrößen benötigten verfahrensrelevanten Wirkelemente festlegt.<sup>74</sup> Die Elemente stehen durch Prozessgrößen miteinander in Verbindung, wobei gewollte und ungewollte Größen unterschieden werden. Gewollte Größen wie die Eingangsgröße und die aus den inneren Eigenschaften des Produktes resultierende Wirkgröße stellen ebenso wie die Rückwirkung aus dem Prozess gewollte Prozessgrößen dar. Sie werden benötigt, um die zweckdienliche Transformation auszuführen. Stör- und Nebengrößen hingegen sind ungewollter Natur. Im Prozessmodell sind sie schiefwinklig dargestellt. Störgrößen sind externe Größen und können aus der Umgebung auf den Prozess und das Arbeitsmittel wirken. Nebengrößen sind ungewollte bzw. unbeabsichtigte Größen, die durch den Prozess ebenso entstehen können wie durch das Arbeitsmittel und auf ebendiese und die Umgebung wirken können.<sup>75</sup> Größen können Energien, Stoffe und Signale sein. Das Arbeitsmittel kann durch geeignete Produktmodelle konkretisiert werden.<sup>76</sup> Den Stand der Forschung in Bezug auf das Verständnis von Prozessen fasst Definition 2.1.6 zusammen.

<sup>74</sup>Vgl. GRAMLICH (2013), S. 87.

<sup>75</sup>Vgl. HEIDEMANN (2001), S. 76 f.

<sup>76</sup>Vgl. HEIDEMANN (2001), S. 88 f.

### Definition 2.1.6.: Prozess

Ein *technischer Prozess* beschreibt die zweckdienliche Zustandsänderung eines Objektes in einem Zeitintervall, indem eine Menge von Objektzuständen in einer zeitlichen Abfolge betrachtet wird.

HEIDEMANN (2001), S. 71

□

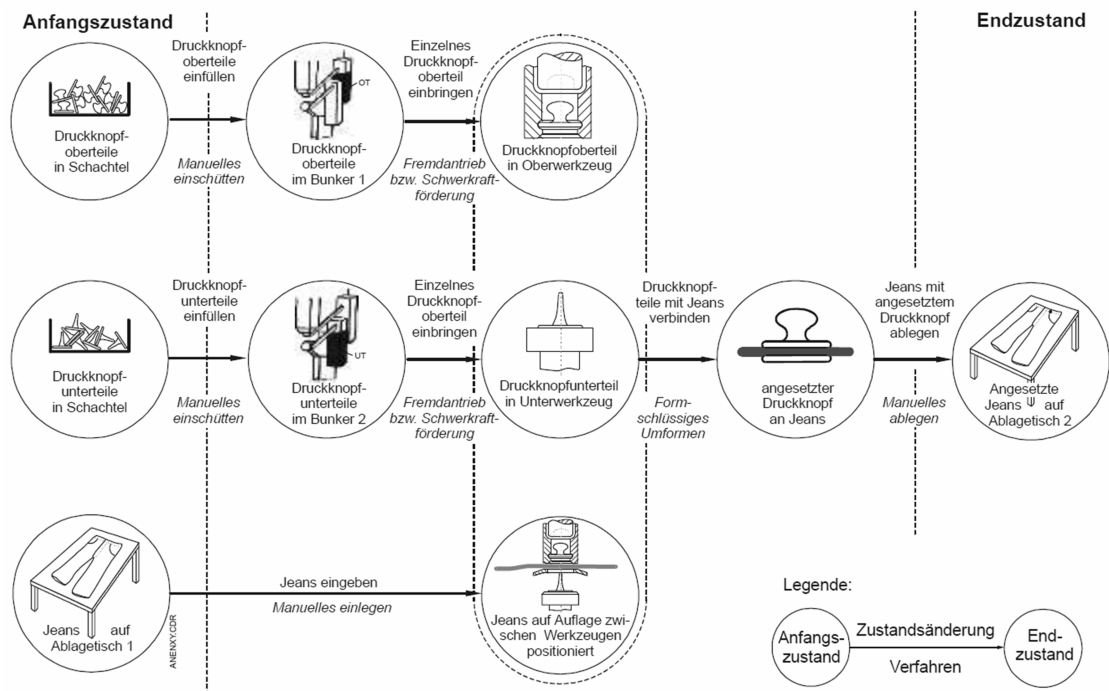


Abbildung 2.9: Prozessstruktur eines Prozesses zum Ansetzen von Knöpfen an Jeanshosen.<sup>77</sup>

In der Produktentwicklung werden Prozessmodelle zur *Prozessanalyse*, zur *Prozesssynthese* und zur *Aufgabenklärung* im Rahmen des Projektdefinitionsprozesses verwendet.<sup>78</sup> Abbildung 2.8 zeigt die detaillierteste Form des Prozessmodelles nach HEIDEMANN, es kann durch Weglassen von Modellelementen jedoch zweckmäßig vereinfacht werden. So ist das detaillierte Prozessmodell sehr gut geeignet um systematisch Anforderungen zu ermitteln, indem die einzelnen Modellelemente, bspw. Störgrößen, gezielt nacheinander abgefragt werden. Im Rahmen der Prozesssynthese kann es jedoch sinnvoll sein sich bewusst von Bekanntem zu lösen und zunächst nur die Prozessstruktur ohne Arbeitsmittel zu betrachten. Abbildung 2.9 zeigt ein Anwendungsbeispiel für eine solche Prozessstrukturmodellierung. Der Ansatzprozess für Knöpfe an Jeanshosen wird schrittweise erarbeitet. Zunächst sind nur der Anfangs- und der Endzustand des gesamten Prozesses

<sup>77</sup>Quelle: Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 29.

<sup>78</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 25 f.

bekannt. Zur Reduktion der Komplexität werden im nächsten Schritt zweckmäßige Zwischenzustände festgelegt, vgl. Abbildung 2.9. Beispielsweise muss das Druckknopfoberteil gebunkert und in das Werkzeug eingelegt werden. Auf Basis der Prozessstruktur kann dann über *Verfahren* festgelegt werden wie die einzelnen Teilprozesse auszuführen sind. Beispielsweise kann das Bunkern der Druckknopfoberteile durch manuelles Einschütten realisiert werden.

### 2.1.3 Theorie der Entwicklungsprozesse

Unter *Konstruktionsmethodik* versteht man ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, vgl. Definition 2.1.2. Hierzu gehören Vorgehenspläne, die flexibel an die jeweilige Problemlage angepasst werden.<sup>79</sup> Vorgehenspläne, bzw. Vorgehensmodelle, ermöglichen das dem Wesen von Methoden inhärente, planmäßige, regelbasierte Vorgehen.<sup>80</sup> In Abhängigkeit von der Entwicklungsschule und der Art der Entwicklungsaufgabe existieren allein im deutschsprachigen Raum eine Vielzahl von Vorgehensmodellen. Die für diese Arbeit wichtigsten Modelle werden im Folgenden vorgestellt.<sup>81</sup>

#### Methodisches Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte nach VDI 222X

Das in den *VDI Richtlinien 2221* f. vorgestellte allgemeine Vorgehen zur Entwicklung von technischen Systemen stellt ein national wie international anerkanntes Vorgehen dar. Die Richtlinien enthalten, neben der Gliederung der Entwicklung in Arbeitsschritte, Angaben zu weiteren Methoden zur Durchführung der jeweiligen Arbeitsschritte. In der einschlägigen Literatur werden diese Methodenbeschreibungen vielfältig ergänzt. Insgesamt stellt also das Entwickeln nach *VDI 222X* eine umfassende Methodik zur Entwicklung technischer Systeme dar. Die *VDI Richtlinie 2221* untergliedert das Vorgehen zur Entwicklung technischer Systeme in insgesamt sieben Arbeitsschritte, vgl. Abbildung 2.10. Dabei führt jeder dieser Arbeitsschritte zu einem festgelegten Ergebnis. Das Vorgehen, obgleich sequentiell notiert, lässt bedarfsgerechte Sprünge in andere Arbeitsabschnitte zu.<sup>82</sup> Entsprechend kann zwischen den einzelnen Arbeitsschritten vorwärts und

---

<sup>79</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 10.

<sup>80</sup>Vgl. PONN und LINDEMANN (2008), S. 394.

<sup>81</sup>Weitere Beispiele für allgemeine Vorgehensmodelle für die Entwicklung sind das *Münchener Vorgehensmodell* nach LINDEMANN (2009), S. 46, das *SPALTEN Modell* nach ALBERS und MEBOLDT (2007), S. 49, das *Axiomatic Design* nach SUH (1990), S. 128. Weitere Vorgehensmodelle existieren bspw. für die Entwicklung von modularen Produkten (*Metus* nach GÖPFERT und STEINBRECHER (2000), S. 11, oder der *PKT Ansatz* nach KRAUSE und EILMUS (2011), S. 301), oder für die *Produktgenerationsentwicklung* nach ALBERS ET AL. (2014).

<sup>82</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9

<sup>83</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11.

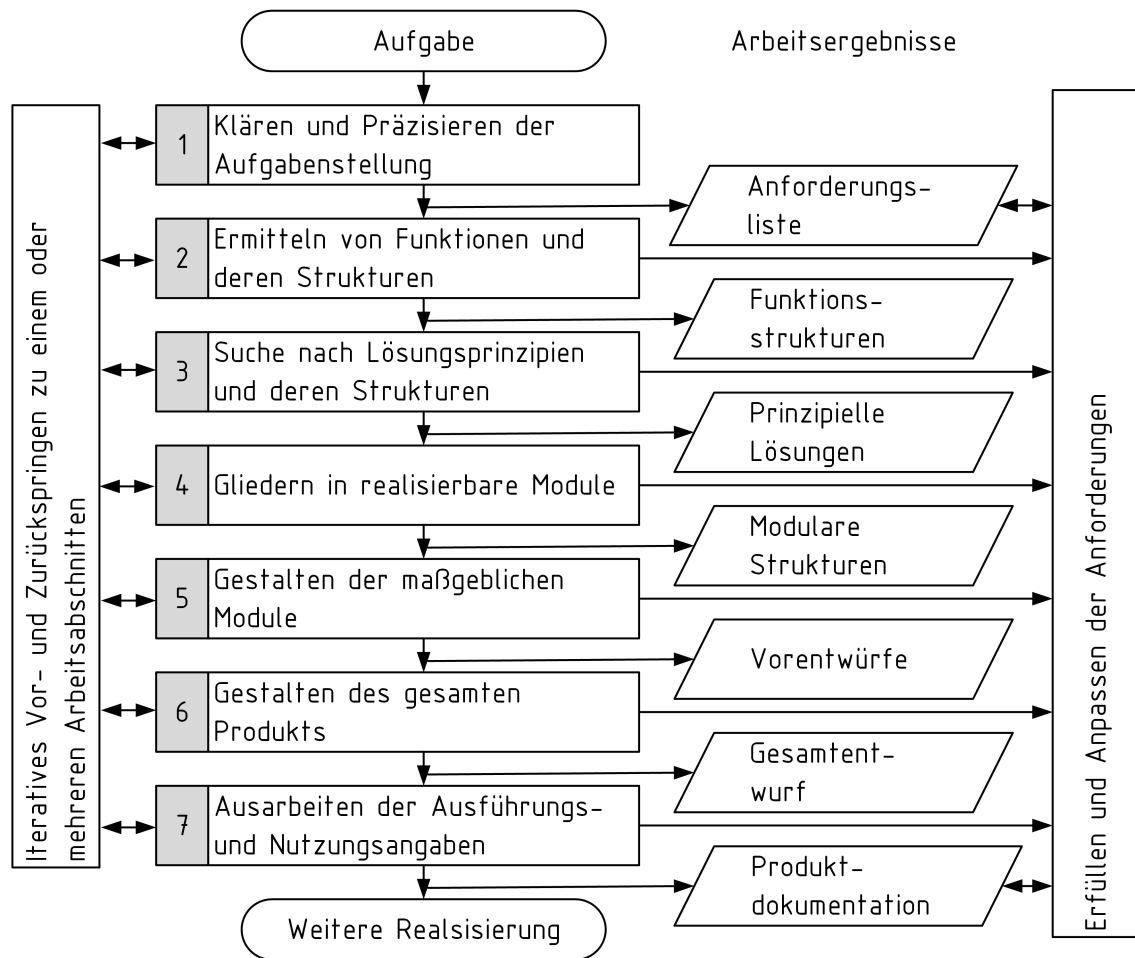


Abbildung 2.10: Vorgehensmodell zur Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme nach VDI 222X.<sup>82</sup>

rückwärts iteriert werden. Das gesamte Vorgehen berücksichtigt Anforderungen während jedes einzelnen Arbeitsschrittes.

Anforderungslisten werden als lebendige Dokumente betrachtet, sie können also im Laufe der Entwicklung verändert werden, wenn neue Erkenntnisse dies erforderlich machen.<sup>84</sup> Die sieben Arbeitsschritte werden in ihrer Gesamtheit als Entwicklungsprozess bezeichnet und weiterhin in vier Entwicklungsphasen bzw. Teilprozesse unterteilt.<sup>85</sup>

Bei der Entwicklung spielt die *Konstruktionsart* eine wichtige Rolle. Je nach Innovationsgrad wird unterschieden in *Neu-*, *Anpassungs-* und *Variantenkonstruktion*. Neukonstruktionen beinhalten das Durchlaufen der Phasen im Entwicklungsprozess von der Funktion ab. Entsprechend müssen Gestaltelemente völlig neu festgelegt werden. An-

<sup>84</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 10.

<sup>85</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 9.

passungskonstruktionen bauen auf weitestgehend unveränderten Wirkprinzipien auf und passen lediglich die Details der Gestaltelemente an neue Randbedingungen an. Vereinzelt sind Rücksprünge in die frühen Phasen zur Ableitung neuer Einzelteile oder Baugruppen nötig. Bei Variantenkonstruktionen sind die Gestaltungselemente weitgehend festgelegt. Typische Variantenkonstruktionen sind Baureihen und Baukästen.<sup>86</sup>

Die Produktidee wird im *Projektdefinitionsprozess* durch Klären der Aufgabenstellung präzisiert und in Form von Anforderungen dokumentiert. Die *Anforderungsliste* ist das Ergebnis des Projektdefinitionsprozesses und stellt die Grundlage für die weitere Entwicklung dar. Die Lösungsfindung gliedert sich in die sogenannte *Konzeptphase* und die *Entwurfsphase* auf. Während der Konzeptphase wird auf Basis der Anforderungsliste eine prinzipielle Gesamtlösung erarbeitet. Die einzelnen Arbeitsschritte werden jeweils durch entsprechende Produktmodelle unterstützt, vgl. Abschnitt 2.1.2. Auf Basis der geklärten Aufgabenstellung wird die Gesamtfunktion abgeleitet und durch Funktionsstrukturen weiter konkretisiert. Für die einzelnen Teilfunktionen der Funktionsstruktur werden dann Teillösungen ermittelt, indem Teilfunktionen durch physikalische Effekte und im nächsten Schritt durch Wirkprinzipien konkretisiert werden. Die Entwicklung erfolgt strukturiert und unter Einsatz von Methoden. Im Fokus der Konzeptphase steht die Funktion des Produktes und damit die Nutzungsphase des technischen Systems. Die Projektdefinitionsphase und die Konzeptphase bilden gemeinsam die sogenannten *frühen Phasen*. Diesen wird in der Literatur eine besondere Wichtigkeit beigemessen.<sup>87</sup> Dies liegt vor allem darin begründet, dass in den frühen Phasen der Entwicklung durch die getroffenen Festlegungen bereits ein Großteil der späteren Kosten determiniert wird. Gleichzeitig sind die Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung zu Beginn am höchsten.<sup>88</sup> Neben der Funktion stehen bei der Gestaltung weitere Aspekte wie bspw. Fertigungsverfahren im Mittelpunkt, die die Gestalt maßgeblich beeinflussen. Die *Gestaltung* ist ein Teilprozess des *Entwerfens*, für das die *VDI Richtlinie 2223* im Sinne eines strukturierten methodischen Vorgehens eine zweckmäßige Folge von *Arbeitsabschnitten* und *Arbeitsschritten* zur Verfügung stellt. Im Vergleich zu den frühen Phasen der Entwicklung kann für die Gestaltung kein einfaches, in aufeinander folgende Arbeitsschritte gegliedertes Vorgehen angegeben werden, wie es für viele andere Teilprozesse der Entwicklung möglich ist.<sup>89</sup> Dies liegt darin begründet, dass die bei der Gestaltung festzulegenden Eigenschaften sehr stark vernetzt sind. Hierdurch wird die Arbeit stark iterativ und korrektiv.<sup>90</sup>

Beim *Gestalten* wird das Produkt auf Basis der prinzipiellen Gesamtlösung weiter bis zum maßstäblichen Entwurf konkretisiert.<sup>92</sup> Es beschreibt diejenigen Tätigkeiten die

---

<sup>86</sup>Vgl. VDI 2223 (2004), S. 15.

<sup>87</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 101

<sup>88</sup>Vgl. EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 13.

<sup>89</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 184.

<sup>90</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 184.

<sup>91</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 194

<sup>92</sup>Vgl. VDI 2223 (2004), S. 17.

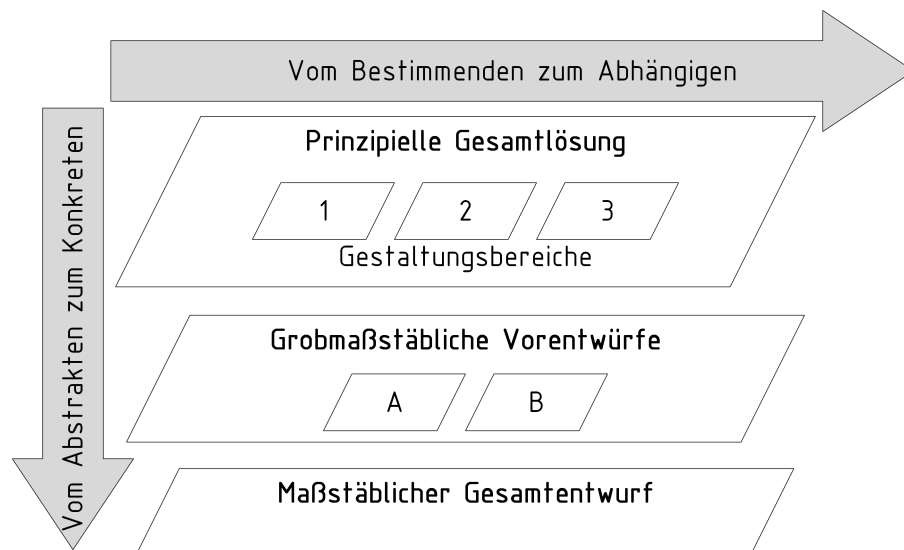


Abbildung 2.11: Vorgehensmodell der strategischen Gestaltung.<sup>91</sup>

die Anordnung von Elementen, geometrischen Formen, Oberflächen, Abmessungen und Materialien festlegen.<sup>93</sup> Dieser Arbeit liegt das in Definition 2.1.7 formulierte Verständnis für das *Gestalten* zugrunde.

### Definition 2.1.7.: Gestalten

Tätigkeit, bei der der Konstrukteur die Gestalt- und Werkstoffeigenschaften von Gestaltungselementen ausgehend von einer prinzipiellen Gesamtlösung, eines Vorgängervorentwurfs und einer Anforderungsliste festlegt und sie in Entwürfen dokumentiert.

BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 186

□

Beim Gestalten entsteht durch die Vielzahl an festzulegenden Eigenschaften (Mengenproblem) und ihrer Verknüpfungen (Vernetztheitsproblem) in Zusammenhang mit den zu berücksichtigenden Randbedingungen und Anforderungen (Korrelationsproblem) ein Komplexitätsproblem. Die Gestaltung als Kompromiss stellt darüber hinaus insgesamt ein Optimierungsproblem dar.<sup>94</sup> Zur Beherrschung dieser Probleme wird bei der Gestaltung in *strategisches* und *taktisches Vorgehen* unterschieden. Beim strategischen Gestalten liegt der Fokus auf der Effektivität der Arbeiten ohne Doppelarbeit und Rücksprünge. Abbildung 2.11 zeigt das zweidimensionale Vorgehensmodell des strategischen Gestaltens. Zum einen wird vom Bestimmenden zum Abhängigen entwickelt, zum anderen vom Abstrakten zum Konkreten.<sup>95</sup> Auf Basis der prinzipiellen Gesamtlösung werden möglichst unabhängige Gestaltungsbereiche identifiziert. Diese können dann unabhängig voneinander bearbeitet werden. Zusätzlich werden die lösungsbestimmenden Bereiche

<sup>93</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 40.

<sup>94</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 187.

<sup>95</sup>Analog hierzu enthält auch die VDI 2223, S.18 ein entsprechendes Vorgehensmodell.

identifiziert, die dann vorrangig bearbeitet werden.<sup>96</sup>

Neben dem übergeordneten strategischen Vorgehen wird in der Gestaltung im Detail iterativ und korrektiv gearbeitet. Dabei wechseln die Vorgänge der Analyse und Synthese sich ständig ab und ergänzen sich.<sup>97</sup> Nach der Festlegung von Gestalteigenschaften eines Gestaltungselements muss überprüft werden, ob diese Einfluss auf andere Bauteile hat und eventuell eine Anpassung bereits festgelegter Eigenschaften erforderlich ist.<sup>98</sup> Zusätzlich muss der Konstrukteur den Gestaltungsprozess so steuern, dass er in der zur Verfügung stehenden Zeit zu einem guten Ergebnis kommt.<sup>99</sup> Diese Abfolge von situativem und begrenztem Entscheiden und Handeln wird als taktisches Vorgehen beim Gestalten bezeichnet, vgl. Abbildung 2.12.<sup>100</sup>

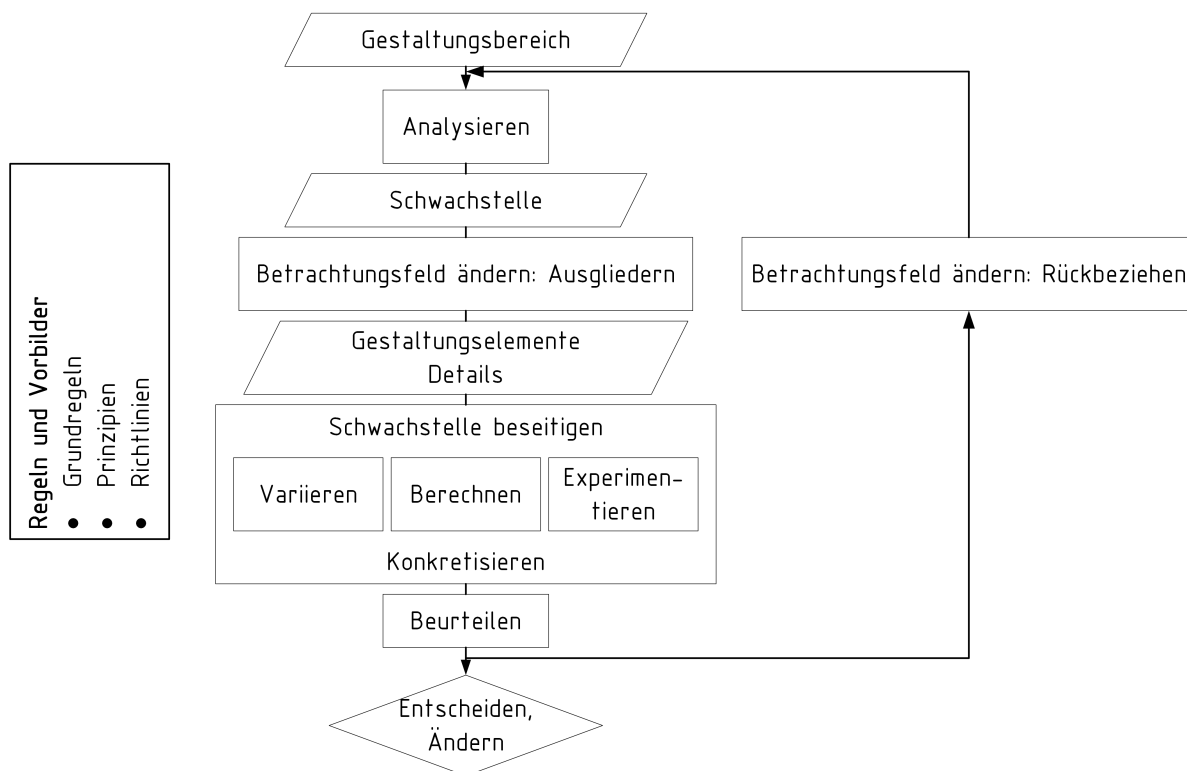


Abbildung 2.12: Vorgehensmodell des taktischen Gestaltens.<sup>101</sup>

Die während des taktischen Gestaltens ausgeführten Tätigkeiten sind so vielfältig, dass sie nicht vollständig beschrieben werden können. Allerdings können einige Grundtätig-

<sup>96</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 206.

<sup>97</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 207; vgl. LEMBURG (2009), S. 82; vgl. VDI 2223 (2004), S. 37

<sup>98</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 209.

<sup>99</sup>Vgl. VDI 2223 (2004), S. 39.

<sup>100</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 208.

<sup>101</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 210

keiten beschrieben werden, die sich immer wiederholen<sup>102</sup> und getrennt voneinander ausgeführt werden, vgl. Abbildung 2.12. Bezüglich der Verknüpfung der Grundtätigkeiten hat sich das in Abbildung 2.12 gezeigte Vorgehen bewährt.<sup>103</sup> Zunächst wird innerhalb eines Gestaltungsbereiches durch Analyse eine Schwachstelle identifiziert. Das bedeutet, dass der Konstrukteur den relevanten Teilaspekt aus dessen Umfeld herauslösen und die Schwachstelle identifizieren muss. Die Schwachstelle wird beseitigt, indem sie durch Variieren, Berechnen und Experimente entweder weiter konkretisiert wird oder aber, durch Veränderung der Gestaltelemente, in ihren Eigenschaften verbessert wird. Eine Beurteilung der überarbeiteten Schwachstelle zeigt, ob der betrachtete Gestaltungsbereich nun die Anforderungen ausreichend gut erfüllt. Falls nicht, müssen im Anschluss weitere Änderungen vorgenommen werden.<sup>104</sup> Bei dem gesamten Vorgang orientiert sich der Konstrukteur ständig an Regeln und Vorbildern, vgl. Abbildung 2.12 links. Diese sind für die vorliegende Arbeit zentral und werden daher in Abschnitt 2.1.3 detailliert erläutert.<sup>105</sup>

Die Ausarbeitungsphase hat schließlich die Anfertigung der möglichst vollständigen Produktdokumentation zum Ziel.<sup>106</sup>

### Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung

Während die Vorgehensweise nach *VDI222X* die Funktion des technischen Produktes in den Mittelpunkt des entwicklerischen Strebens stellt, betont der von BIRKHOFER ET AL. (2012) vorgestellte Ansatz der *ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE)* die Zusammenhänge zwischen Produkt und den Prozessketten des Produktlebens, sowie der Produktentwicklung. Abbildung 2.13 illustriert die verschiedenen Teilprozesse des virtuellen und des realen Produktlebens. Die Prozesskette der Produktentwicklung stellt den virtuellen Teil des Produktlebens von der Idee bis hin zu den Fertigungsunterlagen dar, vgl. *VDI222X*. Die Prozesskette des realen Produktlebens beinhaltet die Teilprozesse Werkstoffherstellung, Produktion, Nutzung und Recycling. Die, auch grafisch sichtbare, Besonderheit der Nutzungsphase besteht in der Rolle des Produktes als Operator. Das technische Produkt erfüllt als Operator den Zweck der angestrebten Zustandsänderung. Bei den anderen Prozessen des realen Produktlebens hat das technische Produkt stets die Rolle des Operanden inne, d.h. es ist selbst Gegenstand der Veränderung. Die beiden Prozessketten sind über die Produktion miteinander gekoppelt. Hier werden die Fertigungsunterlagen und physische Materialien in das reale Produkt überführt.

Die Besonderheit der *GPPE* besteht in der ganzheitlichen, integrierten Betrachtungsweise von Produkt und Prozessen. Randbedingungen, wie bspw. die Festlegung auf be-

---

<sup>102</sup>Vgl. VDI 2225 (1998), S. 38.

<sup>103</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 209.

<sup>104</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 210.

<sup>105</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2017), S. 219.

<sup>106</sup>Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11.



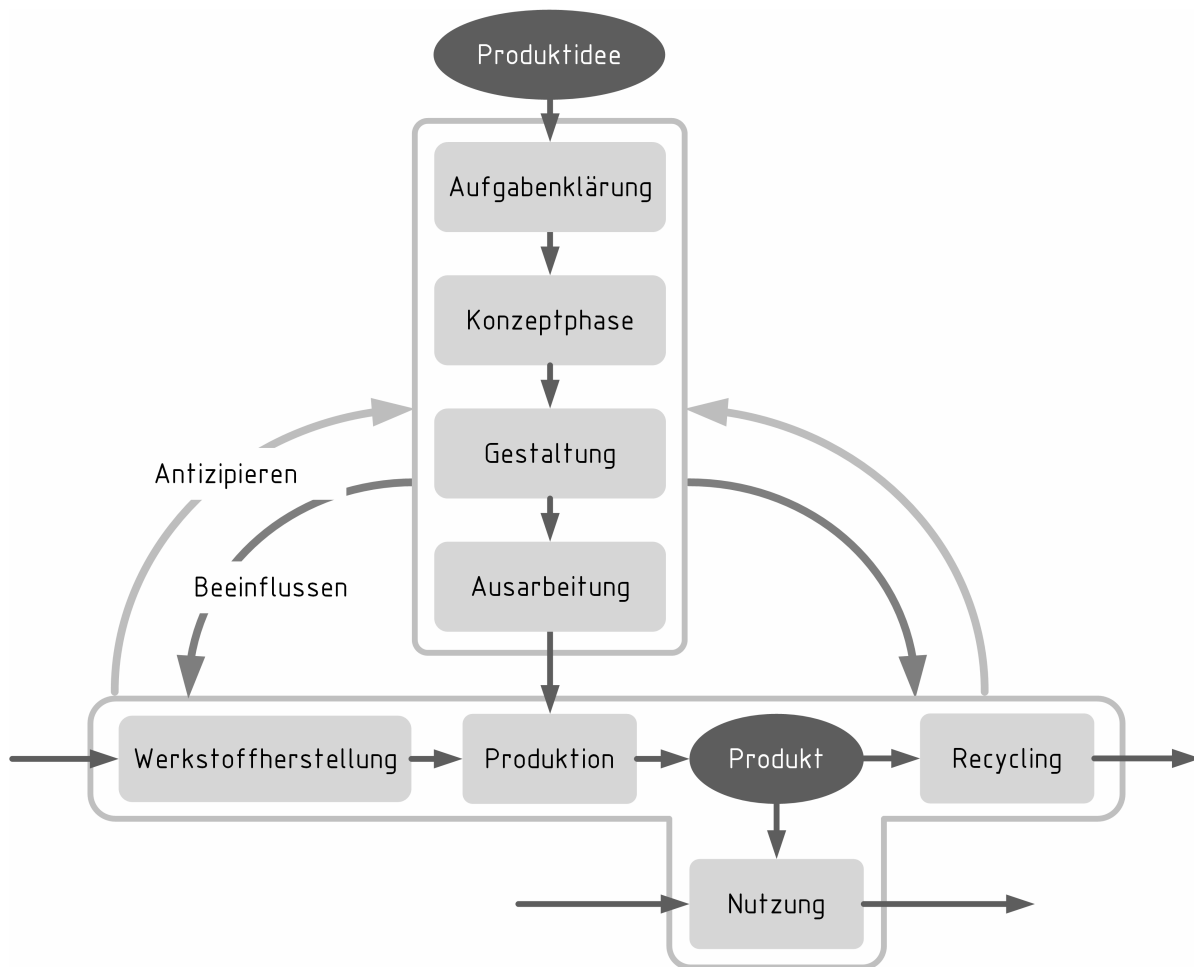


Abbildung 2.13: Zusammenwirken der Prozesskette der Produktentwicklung und der Prozesskette des Produktlebenszyklus im Sinne der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung.<sup>107</sup>

stimmte Fertigungsprozesse, erfordern eine Berücksichtigung bei der Entwicklung (Antizipation). Auf der anderen Seite führen Festlegungen in der Produktentwicklung dazu, dass Prozesse auf eine bestimmte Art ablaufen (Beeinflussen).

### Nutzung von Konstruktionshinweisen in der PE

Die Entwurfsphase ist durch die bereits auf S.28 beschriebenen Probleme (Menge, Vernetzung, Korrelation, Optimierung) von Komplexität geprägt.<sup>108</sup> Um dennoch zielgerichtet zu arbeiten, ist ein methodisches Vorgehen nötig, welches sich an bewährten Lösungen bzw. Lösungsprinzipien orientiert.<sup>109</sup> Diese Lösungen werden, ebenso wie bspw. Konstruktionskataloge, als Hilfsmittel klassifiziert.<sup>110</sup>

Aufgrund der großen Vielfalt möglicher Aufgabenstellungen ist es nicht möglich entwickeln exakte Rezepte oder fertige Lösungen anzubieten. Allerdings ist es möglich Regeln und Vorbilder als Hilfestellung zur Verfügung zu stellen.<sup>111</sup> Regeln stellen Handlungsempfehlungen für den Konstrukteur dar, die erfahrungsbasiert gewonnen werden. Sie können im Sinne des taktischen Gestaltens, vgl. Abbildung 2.12, den Aufwand reduzieren und durch die in ihnen enthaltene Erfahrung das Gestaltungsrisiko reduzieren.<sup>112</sup> Die Beachtung der Konstruktionshinweise verringert in der Regel den Arbeitsaufwand, vermeidet Fehler und Störungen, erhöht die Materialausnutzung und verbessert die Produktqualität.<sup>113</sup> Das Problem Kompromisse finden zu müssen wird hierdurch allerdings nicht aufgelöst und bleibt Teil des Gestaltens.

Grundsätzlich können Konstruktionshinweise<sup>114</sup> in der *Grobgestaltung* und der *Feingestaltung* eingesetzt werden, ob ihre Anwendung zielführend ist hängt jedoch von der Art der Aufgabe und den Anforderungen ab.<sup>115</sup> Auch KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 128 betonen, dass es sich bei Konstruktionshinweisen um „Orientierungshilfen [handelt], die teilweise konkurrieren oder sich sogar widersprechen können und über deren Gültigkeit und Zweckmäßigkeit fallweise entschieden werden muss.“ *Konstruktionshinweise* lassen sich unterschiedlich klassifizieren. Weit verbreitet ist die Einteilung nach Allgemeingültigkeitsgrad und den schwerpunktmäßig adressierten Aspekten, vgl. Abbildung 2.14.<sup>117</sup> PAHL ET AL., S. 314 teilen Konstruktionshinweise in *Grundregeln, Prinzipien*

---

<sup>107</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach BIRKHOFFER ET AL. (2012), S. 566

<sup>108</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 187, oder auch PONN und LINDEMANN (2008), S. 26

<sup>109</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 128.

<sup>110</sup>Vgl. PONN und LINDEMANN (2008), S. 26.

<sup>111</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 226.

<sup>112</sup>Vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2017), S. 226, oder auch VDI 2223 (2004), S. 64

<sup>113</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 781.

<sup>114</sup>In der Literatur finden sich extrem viele unterschiedliche begriffliche Varianten zur Klassifizierung von erfahrungsbasiert gewonnenen Hinweisen. Im Vorgriff auf Definition 5.1.1 werden diese in ihrer Gesamtheit an dieser Stelle ohne ausführliche Herleitung bereits als *Konstruktionshinweise* bezeichnet.

<sup>115</sup>Vgl. EHRENSPIEL (2009), S. 475.

<sup>116</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 129.

<sup>117</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 128.

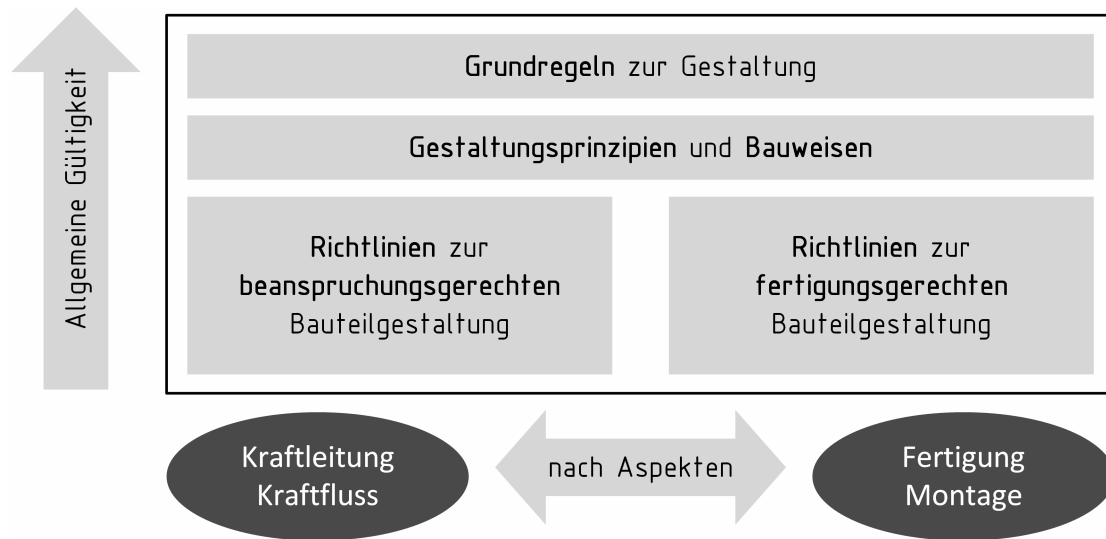


Abbildung 2.14: Hilfsmittel zum methodischen Gestalten.<sup>116</sup>

und *Richtlinien* ein.

*Grundregeln* stellen hierbei zwingende Anweisungen zur Gestaltung dar, deren Nichtbeachtung zu großen „Nachteilen, Fehlern, Schäden oder gar Unglücken“ führt.<sup>118</sup>

*Prinzipien* sind etwas konkreter gefasst als Grundregeln und verfolgen immer ein bestimmtes Ziel, bspw. minimales Gewicht. Damit können nicht alle Prinzipien gleichzeitig in einer technischen Lösung umgesetzt werden. Ihre übergeordnete Bedeutung ist damit im Vergleich zu den Grundregeln, die immer gelten, eingeschränkt.<sup>119</sup>

|                     |                   |                        |                    |                    |
|---------------------|-------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Ergonomiegerecht    | Sicher            | Demontagegerecht       | Werkstoffgerecht   | Risikogerecht      |
| Verschleißgerecht   | Wartungsgerecht   | Instandhaltungsgerecht | Variantengerecht   |                    |
| Langlebig           | Fertigungsgerecht | Montagegerecht         | Zuverlässig        | Ausdehnungsgerecht |
| Reperaturfreundlich | Korrosionsgerecht | Robust                 | Formgebungsgerecht |                    |
| Normengerecht       | Emissionsarm      | Instandhaltungsgerecht | Reinigungsgerecht  |                    |

Abbildung 2.15: Beispielhafte Übersicht der *Gerechtheiten*.<sup>120</sup>

Abgesehen von den Grundregeln und Prinzipien sind *Gestaltungsrichtlinien* zu beachten<sup>121</sup>. Diese sogenannten *Gerechtheiten* sind meist als *gut/schlecht-Beispiel* formulierte Anweisungen zur Erreichung spezieller Hauptziele, vgl. Abbildung 2.15. Sie sind im All-

<sup>118</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 314.

<sup>119</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 353.

<sup>120</sup>Quelle: Eigene angepasste Darstellung nach PONN und LINDEMANN (2008), S. 27.

<sup>121</sup>Im Englischen Design for X (DfX) bzw. Design to X (DtX).

gemeinen spezifisch, unterstützen jedoch die Umsetzung der Grundregeln.<sup>122</sup> In der Form der Informationsaufbereitung unterscheiden sich Gestaltungsrichtlinien zum Teil erheblich. Es finden sich sorgfältig aufbereitete Kataloge mit Beispiellösungen zur Illustration der jeweiligen Hauptmerkmale<sup>123</sup> ebenso wie rein textuell formulierte Regeln oder Tabellen<sup>124</sup>.

Wie oben beschrieben stellen Konstruktionshinweise ein Hilfsmittel innerhalb eines methodischen Vorgehens dar, vgl. auch Abbildung 2.12. Entsprechend bedarf es einer Einordnung in den Entwicklungsprozess, um zu verstehen wie Konstruktionshinweise eingesetzt werden. Einen Vorschlag hierzu machen TEKKAYA ET AL. (2015). Sie kombinieren das von BOOTHROYD ET AL. (2011) für das *Design for Manufacturing (DfM)* entwickelte Vorgehen zum Arbeiten mit Gestaltungsrichtlinien mit der *GPPE*, vgl. Abbildung 2.16. Auf den verschiedenen Konkretisierungsstufen der PE können demnach

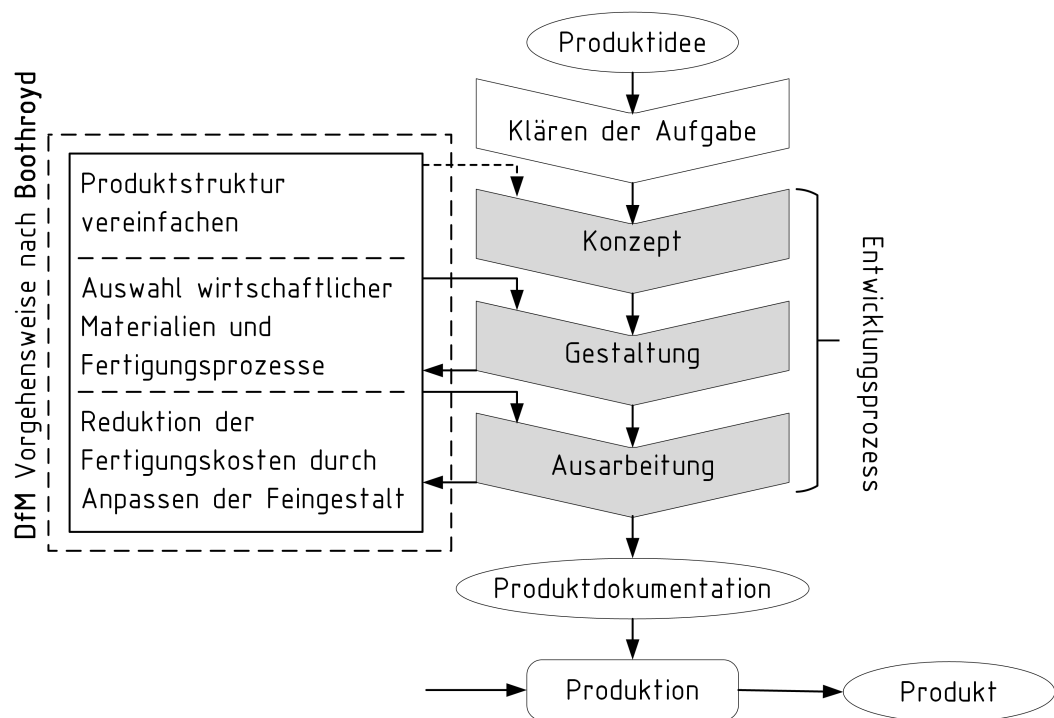


Abbildung 2.16: Vorgehensmodell zur Einbindung des *DfM* in die *GPPE*.<sup>125</sup>

Richtlinien des DfM unterschiedliche Beiträge leisten. Informationen aus den Hinweisen werden in der Entwicklung verwendet und fließen in Form zusätzlicher Erfahrung auch wieder in die Hinweise selbst zurück. Der Einsatz von Richtlinien in der Konzeptphase

<sup>122</sup>Vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 393.

<sup>123</sup>Vgl. BOOTHROYD ET AL. (2011).

<sup>124</sup>Vgl. FABER ET AL. (2016), S. 56 f.

<sup>125</sup>Quelle: Eigene, durch den Autor übersetzte Darstellung nach TEKKAYA ET AL. (2015), S. 648.

ist nur eingeschränkt möglich, da der Detaillierungsgrad der Lösungen noch zu gering für die spezifische, in den Richtlinien enthaltene, Information ist.

In der Gestaltung und der Ausarbeitung liegen die Produkteigenschaften fest, entsprechend können Richtlinien zur Berücksichtigung von Aspekten der Fertigung zweckmäßig eingesetzt werden.

## 2.2 Grundlagen zu Unsicherheit

Unsicherheit ist in technischen Fragestellungen seit jeher von Bedeutung und daher auch in der technischen Literatur allgegenwärtig, wobei je nach Fachrichtung und Betrachtungszweck sowohl unterschiedliche Definitionen der Termini, als auch sehr unterschiedliche Einteilungen von Unsicherheit existieren.<sup>126</sup> Auch der empfohlene Umgang mit Unsicherheit ist sehr unterschiedlich. So wird bis heute in der Ausbildung und Praxis ingenieurwissenschaftlicher Berufe mit *deterministischen Werten* unter Zuhilfenahme sogenannter *Sicherheitsbeiwerte* gerechnet.<sup>127</sup> Dabei erkennt schon HUBKA, S. 101 die Notwendigkeit Eigenschaften technischer Systeme nach Möglichkeiten der Quantifizierbarkeit zu unterscheiden, explizit von Unsicherheit spricht er jedoch nicht. PAHL ET AL., S. 112 schlagen vor den Unsicherheiten mit einem systematischen Vorgehen zu begegnen. Zusätzlich reflektieren sie die Verwendung quantitativer Zahlenwerte und empfehlen Eigenschaften „nur dann quantitativ in Zahlenwerten anzugeben, wenn das mit genügender Genauigkeit auch möglich ist. Andernfalls ist es richtiger, verbale Schätzangaben (z.B. hoch, mittel, tief) zu machen, deren Ungenauigkeitsgrad klar zu erkennen ist.“ Eine einheitliche Definition von Unsicherheit besteht in der Literatur nicht. GROTE und FELD-HUSEN, S. F9 verwenden Informationsmangel und Unsicherheit synonym. BERTSCHE ET AL. (2009), S. 57 versteht Unsicherheit als eine Situation, in der es unmöglich ist einen Sachverhalt exakt zu beschreiben. Die verschiedenen Auffassungen haben jedoch immer ein Fehlen von Information gemein.<sup>128</sup> Für diese Arbeit wird, aufbauend auf der Literatur, Definition 2.2.1 aus der *DIN EN ISO 31000* verwendet.

### **Definition 2.2.1.: Unsicherheit**

*Unsicherheit* ist der Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen über ein Ereignis, seine Auswirkung oder seine Wahrscheinlichkeit ergibt.

Vgl. DIN EN ISO 31000 (2011), S. 9

□

Unsicherheit wird häufig als zusammengesetztes Nomen mit einem Prozess oder Gegenstand als erstem Wortbestandteil konkretisiert. So wird bspw. von Modellunsicherheit

---

<sup>126</sup>Einen kompakten Überblick der verschiedenen Klassifikationen geben KREYE ET AL. (2011), oder auch THUNISSEN (2005), S. 24 f.

<sup>127</sup>Vgl. bspw. GROTE und FELD-HUSEN (2007), S. C51, G13.

<sup>128</sup>Vgl. BERTSCHE ET AL. (2009), S. 57; vgl. KNETSCH (2004), S. 30; vgl. PAHL ET AL. (2007), S. 112; vgl. THUNISSEN (2005).

oder Messunsicherheit gesprochen. Letztere setzt sich aus systematischen und zufälligen Messabweichungen zusammen<sup>129</sup> und ist damit ein Beispiel für die in der Literatur weit verbreitete Klassifizierung von Unsicherheit nach KNETSCH (2004), S. 30.<sup>130</sup> Abbil-

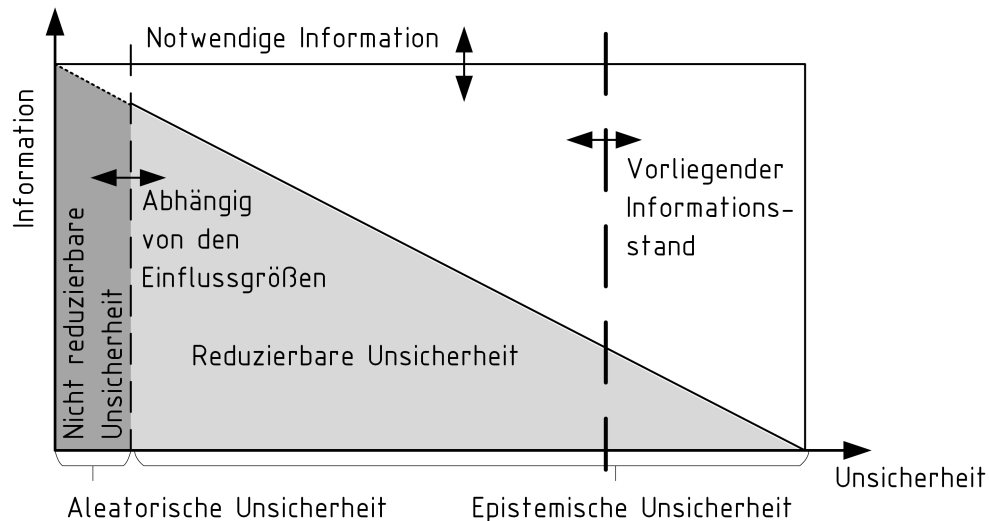


Abbildung 2.17: Klassifizierung von Unsicherheit nach Knetsch.<sup>131</sup>

Abbildung 2.17 zeigt diese Klassifizierung, die im Wesentlichen auf der Unterscheidung von Unsicherheit in *epistemische* und *aleatorische Unsicherheit* beruht. *Epistemische Unsicherheit* ergibt sich aus der Folge ungenauer Kenntnis eines Sachverhalts. *Aleatorische Unsicherheit* beschreibt die statistische Unsicherheit durch zufällige Variation infolge der stochastischen Natur von Einflussgrößen. Ein *vorliegender Informationsstand* ist demnach grundsätzlich unsicherheitsbehaftet, aus der vorliegenden Art der Unsicherheit lassen sich allerdings Vorgehensweisen zum Umgang ableiten.<sup>132</sup> So kann epistemische Unsicherheit durch Recherche, Experimente o.ä. reduziert werden, während die vorliegende Information steigt. Gleichzeitig berücksichtigt KNETSCH (2004) die für die Erstellung eines Modells notwendige Information und adressiert damit das ökonomische Prinzip als notwendige Grundlage beim Umgang mit Unsicherheit. Es gilt Information nur so genau wie nötig zu erfassen, um ein Problem, oder eine Fragestellung, bearbeiten zu können. In Abbildung 2.17 ist diese gegeben, wenn der vorliegende Informationsstand und die notwendige Information denselben Schnittpunkt mit der Geraden haben. Für die Produktentwicklung sind Methoden zur effizienten Beschaffung von Informationen zur Reduktion epistemischer Unsicherheit von zentraler Bedeutung.<sup>133</sup>

<sup>129</sup>Vgl. GROTE und FELDHOUSEN (2007), S. W4.

<sup>130</sup>Vgl. ebenso THUNISSEN (2005), S. 24

<sup>131</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach KNETSCH (2004), S. 31

<sup>132</sup>Vgl. KREYE ET AL. (2011).

<sup>133</sup>Vgl. KREYE ET AL. (2011), S. 97.

Der interdisziplinäre SFB 805 an der *TUD* „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ befasst sich intensiv mit Unsicherheit. Das Ziel ist es auf Basis eines gemeinsamen Verständnisses von Wesen und Auftreten von Unsicherheit mit Hilfe von Technologien und Methoden einen Beitrag zur Beschreibung, Bewertung und Beherrschung von Unsicherheit zu leisten. Der Ansatz des SFB 805 ist hierbei ganzheitlich orientiert an der *GPPE* und fußt auf starker Vernetzung zwischen den verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen. Dabei steht zunächst das technische System im Mittelpunkt des Interesses.<sup>134</sup> Ziel ist die systematische Steigerung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, bspw. durch die Verringerung von Überdimensionierung.<sup>135</sup>

Gemeinsame Grundlage aller im SFB 805 vereinten Disziplinen ist die Hypothese, dass alle Prozesse (Phasen) des Produktlebens, sowohl die virtuellen wie auch die realen, unsicherheitsbehaftet sind. Die von HANSELKA und PLATZ (2010), S. 57 formulierte Arbeitshypothese des SFB 805 liegt auch der vorliegenden Arbeit zugrunde und lautet: *Unsicherheit tritt auf, wenn Prozesseigenschaften eines Systems nicht oder nicht vollständig determiniert werden können.*<sup>136</sup>

Dabei wird der Terminus *Unsicherheit* im Allgemeinen entsprechend Definition 2.2.1 gebraucht. Die wesentliche Erweiterung des Verständnisses von Unsicherheit besteht in der Verknüpfung von Unsicherheit mit Prozessen über sogenannte *Prozesseigenschaften*. Abbildung 2.18 zeigt das SFB 805 *Prozessmodell*<sup>137</sup> in der einfachsten Form.<sup>138,139</sup> Das technische System wird als Kombination aus Prozess und Arbeitsmittel verstanden, wobei der prozedurale Charakter im Vordergrund steht. Der Prozess selbst wird beschrieben als die zeitliche Überführung von Anfangs- in Endzustände des Operanden, vgl. Definition 2.1.6. Zustände werden über Eigenschaftsvektoren angegeben. Systemeigenschaften können hierbei Produkteigenschaften, oder auch Prozesseigenschaften sein. Operanden können Prozessketten durchlaufen.

Im SFB 805 Prozessmodell werden zusätzlich *Einflussgrößen* berücksichtigt, die zunächst unspezifisch auf das System als Ganzes wirken und die sich zur Gliederung von Informationen in Bezug auf Unsicherheit eignen. *Störgrößen* sind *Einflussgrößen* von außerhalb der Systemgrenze, die auf den Prozess wirken. Damit beeinflussen sie direkt die Unsicherheit des Prozesses und als Folge davon auch die Zustände in Form von Schwankungen der Prozess- und Produkteigenschaften. Durch Semantik werden Daten interpretierbar und zu *Information*. Informationen sind Informationsquellen, welche oh-

---

<sup>134</sup>Vgl. HANSELKA und PLATZ (2010), S. 55.

<sup>135</sup>Vgl. HANSELKA und PLATZ (2010), S. 59 f.

<sup>136</sup>Vgl. HANSELKA und PLATZ (2010), S. 57.

<sup>137</sup>Vgl. EIFLER ET AL. (2011), S. 137.

<sup>138</sup>Streng genommen handelt es sich um ein *Systemmodell*.

<sup>139</sup>Je nach Zweck der Analyse werden im *SFB 805* Systemmodelle verschiedener Detaillierungsstufen verwendet. An dieser Stelle sei auf die Modelle in KLOBERDANZ ET AL. (2009), oder auch FREUND ET AL. (2014) verwiesen.

<sup>140</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach EIFLER ET AL. (2011), S. 137

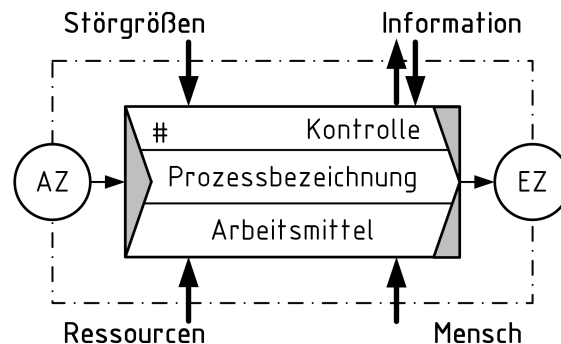


Abbildung 2.18: SFB 805 Prozessmodell.<sup>140</sup>

ne menschliche Transferleistung bzw. Interpretation den Prozess beeinflussen, oder den Menschen in seiner Handlung einschränken.

Die Beziehung zur Außenwelt des Systems ist reziprok. *Ressourcen* sind Operatoren, welche für die Durchführung eines Prozesses benötigt werden. Ressourcen können in einem Subprozess zum Arbeitsmittel werden. Umgekehrt sind alle, in einem Subprozess eingesetzten Arbeitsmittel, in einem übergeordneten Prozess als Ressource aufzuführen.<sup>141</sup> *Menschliche Einflussgrößen* sind beispielsweise Handlungen, Eingriffe, Wissen, Erfahrung von Menschen, die einen Prozess beeinflussen.

Mit Hilfe des Verständnisses der GPPE und der Möglichkeit die verketteten Prozesse der Produktlebensphasen beschreiben zu können ist die Grundlage zur systematischen Beschreibung von Unsicherheit in technischen Systemen vorhanden. Unsicherheit tritt also in allen Prozessen des Produktlebens in Form von Einflussgrößen auf und wird in schwankenden Zuständen der Operanden beobachtbar.

Zur Einteilung der Unsicherheit selber wird das von ENGELHARDT ET AL. (2010) vorgestellte *Unsicherheitsmodell des SFB 805* verwendet, vgl. Abbildung 2.19. Grundsätzlich wird Unsicherheit kleiner je mehr gesicherte Information vorliegt, vgl. Abbildung 2.17. Unsicherheit wird außerdem in zwei Ebenen nach dem Wissen über die Wirkung und dem Wissen über die Wahrscheinlichkeit in drei Kategorien eingeteilt. *Unwissen* liegt vor, wenn sowohl Ausprägungen als auch die resultierenden Abweichungen einer betrachteten Eigenschaft (noch) unbekannt sind. *Ungewissheit* beschreibt die Situation, dass die Ausprägungen einer unsicheren Eigenschaft bekannt sind. Dennoch kann keine genaue Aussage über die Verteilung der Unsicherheit der zu erwartenden Eigenschaft gemacht werden. *Stochastische Unsicherheit* ist der Bereich, bei dem eine Eigenschaft genau beschrieben werden kann. Dies erfolgt in Form einer, idealerweise vollständigen, Wahrscheinlichkeitsverteilung.<sup>143</sup>

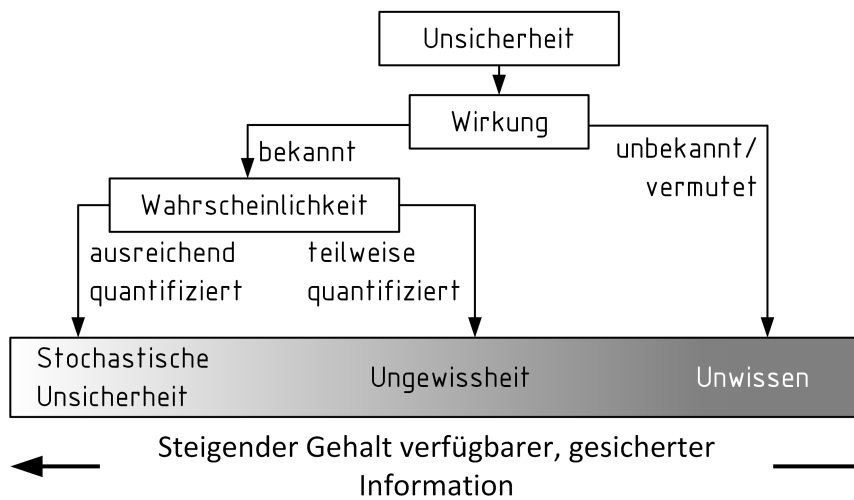
<sup>141</sup>Vgl. SFB 805 (2012), S. 16.

<sup>142</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach ENGELHARDT ET AL. (2010).

<sup>143</sup>Vgl. ENGELHARDT (2012), S. 21.

<sup>144</sup>Quelle: Vgl. ENGELHARDT (2012), S.55.




Abbildung 2.19: Unsicherheitsmodell des SFB 805.<sup>142</sup>

| Methoden | UME | Modelle   |  |   |  |             |
|----------|-----|---|--|---|--|-------------|
|          |     |   |  |   |  | Entscheiden |
|          |     | Umfeld / Ziel Analyse   | Identifikation von Unsicherheit  | Wirkung von Unsicherheit  | Bewerten von Unsicherheit  |             |
|          |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Umfeldmodell</li> <li>Zielanalyse</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessmodell</li> <li>Eigenschaftsmodell</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wirkkettenmodell</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beurteilungsmodell</li> <li>Entscheidungsmodell</li> </ul>  |             |
|          |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fragelisten</li> <li>Delphi-Methode</li> <li>QFD</li> <li>SWOT</li> <li>Umfeldanalyse (5M)</li> <li>ZHA</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>HAZOP</li> <li>Expertenbefragung</li> <li>Fault-Tree Analysis</li> <li>Eigenschafts-/Prozessbeziehungen</li> <li>Ursachenanalyse</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETA</li> <li>Expertenbefragung</li> <li>Auswirkungsteil FMEA</li> <li>Wirkungsdiagramme</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bewertungsteil ZHA</li> <li>Risikoanalyse</li> <li>Bewertungsteil FMEA</li> <li>Kostenanalyse</li> <li>Zuverlässigkeitsanalyse</li> <li>Entscheidungstheorie</li> </ul> |             |

Abbildung 2.20: Vorgehensmodell der UMEA.<sup>144</sup>

Die Einteilung von Unsicherheit ermöglicht die Ableitung von Maßnahmen zum Umgang mit ihr. Allerdings setzt dies die Kenntnis über die Unsicherheit voraus. Aus diesem Grund wird in der Arbeit von ENGELHARDT (2012) die sogenannte *Uncertainty Mode and Effects Analysis* (UMEA) erarbeitet, vgl. Abbildung 2.20. Das Vorgehen aus vier Schritten bietet Modelle und Methoden zur *Umfeld- und Zielanalyse*, *Identifikation von Unsicherheitsursachen*, *Identifikation von Unsicherheitsauswirkungen* und *Evaluiere und Entscheiden*. EIFLER (2014) erweitert die UMEA, indem er die Prozessketten entlang des Produktlebens formalisiert über verkettete Eigenschaftsnetzwerke in Sensitivitätsmatrizen abbildet. Dabei verwendet er die Modellelemente des detaillierten Prozessmodells nach HEIDEMANN, vgl. Abbildung 2.8, als Gliederungsmerkmale.

### 2.2.1 Grundlagen zur Beherrschung von Unsicherheit

Die UMEA liefert Informationen über die im technischen System über alle Prozesse auftretende Unsicherheit und eine Bewertung ihrer jeweiligen Auswirkung. Im Anschluss an die UMEA muss im nächsten Schritt die systematische *Beherrschung* dieser Unsicherheit erfolgen. Diese Tätigkeit wird im Allgemeinen als *Robust Design* bezeichnet. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses existieren sehr viele verschiedene Ansätze zur Erhöhung der Robustheit. An dieser Stelle werden jedoch ausschließlich, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigten, Grundlagen vermittelt. Für eine ausführlichere Zusammenfassung der verschiedenen verfügbaren Methoden sei auf MATHIAS (2015) und GÖHLER und HOWARD (2014) verwiesen.

### 2.2.2 Robust Design

Aus etymologischer Sicht leitet sich der Begriff *Robustheit* im deutschen Sprachgebrauch vom lateinischen Wort *robustus* (Eiche) ab. Die Charakterisierung eines Gegenstandes als *robust* im Sinne von *eichern* betonte die Widerstandsfähigkeit des Gegenstandes, da die Eiche als besonders strapazierfähig und unempfindlich galt.<sup>145</sup> Unsicherheit äußert sich in nicht determinierten, schwankenden Objekteigenschaften. Ein technisches System wird als robust bezeichnet, wenn es sich als widerstandsfähig bzw. unempfindlich gegenüber Unsicherheit erweist. Die Vorgehensweisen zur Erzeugung dieser Systemeigenschaft werden im Folgenden als Robust Design bezeichnet, welches als Mittel zur Beherrschung von Unsicherheit eingesetzt wird. Damit ist der grundsätzliche Zusammenhang der Begriffe *Unsicherheit*, *Beherrschung von Unsicherheit*, *Robustheit* und *Robust Design* hergestellt.

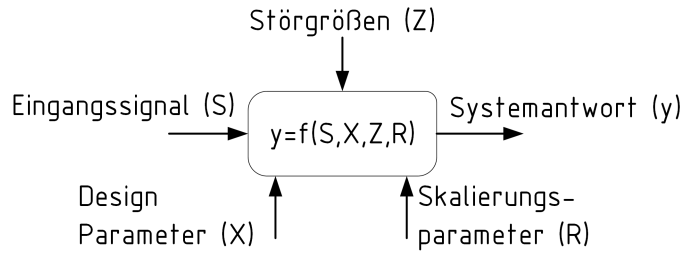
Der Begründer des Robust Design ist der Japaner *Genichi Taguchi*<sup>147</sup>. Ausgehend von dem Verständnis Taguchis bezeichnet Robustheit die Unempfindlichkeit vom Nut-

---

<sup>145</sup>Vgl. DUDEN

<sup>146</sup>Quelle: Eigene Darstellung.

<sup>147</sup>*Taguchi Gen'ichi* (\* 1. Januar 1924 in Tōkamachi; † 2. Juni 2012) war ein japanischer Ingenieur, Statistiker und Experte für Qualitätsverbesserung.

Abbildung 2.21: *P Modell*.<sup>146</sup>

zer wahrgenommener, funktionaler Charakteristiken eines Systems in Bezug auf Störgrößenexposition.<sup>148,149</sup> Taguchi nutzt zur Beschreibung technischer Systeme (Produkt) das sogenannte *P Modell*, vgl. Abbildung 2.21. Es kann als funktional/struktural modelliertes technisches System verstanden werden, vgl. Abschnitt 2.1.2. Eingangssignale werden in Ausgangssignale umgewandelt, wobei das System mit seinen Eigenschaften das Verhältnis der Größen festlegt.<sup>150</sup> Das Modell erfasst explizit diejenigen Systemeigenschaften, die der Konstrukteur in Bezug auf einen gewollten Systemausgang festlegen kann (*Design Parameter*) und sogenannte *Skalierungsparameter*. *Design Parameter*, vgl. *konstruktive Parameter* auf Seite 17, können grundsätzlich verschiedene Werte annehmen, je nachdem in Bezug auf welche Charakteristik ein System ausgelegt sein soll, bspw. minimale Kosten, Stabilität, oder Robustheit. Die Festlegung der Design Parameter ist also ein multikriterieller Optimierungsprozess. *Skalierungsparameter* bilden eine Untergruppe der Design Parameter, die einen Wertebereich annehmen dürfen. Skalierungsparameter werden verwendet, um ein Systemverhalten, vgl. Definition 2.1.5, anpassbar bzw. einstellbar zu machen. *Störgrößen* wirken auf das System ein und können unter Umständen den gewollten Systemausgang beeinflussen.<sup>151</sup> Taguchi unterscheidet Störgrößen in *outer noise*, *inner noise* und *between product noise*. *Outer noise* sind schwankende Umgebungsbedingungen, *inner noise* bezeichnet die zeitliche Veränderung des technischen Produktes und *between product noise* zielt auf Fertigungsschwankungen ab.<sup>152</sup>

Der Zusammenhang zwischen schwankenden Design Parametern  $X$  und ihrer Auswirkung auf die Funktionserfüllung  $y$  wird mit Hilfe der sogenannten *Transfer Function* dargestellt, vgl. Abbildung 2.22. Die verschiedenen Kurven deuten hierbei den Einfluss der Skalierungsparameter  $R$  an. Je flacher die Übertragungsfunktion im jeweiligen Schwankungsbereich des Design Parameters  $x_i$  ausfällt, desto geringer pflanzt sich die

<sup>148</sup>Vgl. TAGUCHI ET AL. (1990); vgl. TAGUCHI ET AL. (2000); vgl. TAGUCHI ET AL. (2005)

<sup>149</sup>Auch ULRICH und EPPINGER (2008), S. 268 verstehen unter Robustheit die Unempfindlichkeit gegenüber nicht-idealen Umgebungsbedingungen.

<sup>150</sup>Vgl. TAGUCHI ET AL. (2005), S. 333.

<sup>151</sup>Vgl. PHADKE (1986), S. 53.

<sup>152</sup>Vgl. TAGUCHI ET AL. (2005), S. 176.

<sup>153</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach ANDERSSON (1996)(2), S. 11.

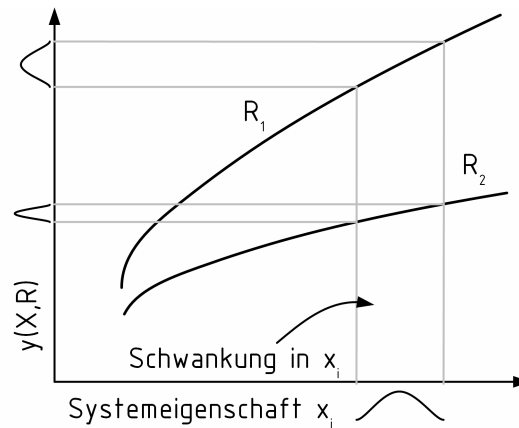


Abbildung 2.22: Allgemeine Darstellung der *Transfer Function*.<sup>153</sup>

Schwankung im Systemausgang fort. Im Beispiel in Abbildung 2.22 sind zwei Übertragungsfunktionen dargestellt. Das System reagiert bei  $R_1$  deutlich empfindlicher auf die Schwankung in  $x_1$  als im Fall von  $R_2$ . Entsprechend ist das System robuster, wenn die Übertragungsfunktion mit Skalierungsparameter  $R_2$  eingestellt wird.

Mit seinem Systemverständnis adressiert *Taguchi* die Nutzungsphase und stellt heraus, dass die entscheidenden funktionalen Größen des technischen Systems diejenigen sind, die vom Nutzer in Bezug auf die Produktqualität wahrgenommen werden. ANDERSSON (1997)(2), S. 6 geht über den Ansatz von *Taguchi* wesentlich hinaus, indem er den zunächst funktionalen Zusammenhang im *P Modell* im Kontext von Prozessen als Operator einordnet. Er kombiniert damit die Sicht von *Taguchi* und das Systemverständnis von *Hubka*, vgl. Abschnitt 2.1.2. Zusätzlich fasst *Andersson* den Geltungsbereich des Begriffes Robustheit deutlich weiter, indem er das Aufrechterhalten der Funktion unter Störgrößen, schwankenden Operanden, Umgebungseinflüssen und menschlichen Einflüssen als Robustheit bezeichnet.<sup>154</sup> MØRUP (1993) begreift Robustheit als Systemeigenschaft eines Produktes, die in Bezug auf verschiedene Lebensphasen des Produktes verstanden werden muss. Damit formuliert er bereits die Notwendigkeit der ganzheitlichen Betrachtung von Unsicherheit. Zusätzlich beinhaltet seine Sichtweise bereits das Verständnis, dass ein Produkt beim Durchlaufen der einzelnen Lebensphasen sowohl Operand (Produktion), als auch Operator sein kann (Nutzung). Seine Überlegungen werden schließlich von MATTHIASSEN (1997), S. 67 aufgenommen und zusammen mit den Ergebnissen von Andersson auf die Theorie technischer Systeme, vgl. Abschnitt 2.1.2, und die Eigenschaftstheorie übertragen. Robustheit ist demnach eine Eigenschaft, die an andere Systemeigenschaften (Produkt- und Prozesseigenschaften) geknüpft ist.<sup>155</sup> Robustheit wirkt sich unterstützend auf Funktionen und Prozesse, jeweils beschrieben durch ihre Eigenschaften, in allen Phasen des Produktlebens aus. Ein Fertigungsprozess

---

<sup>154</sup>Vgl. ANDERSSON (1996)(1), S. 54.

<sup>155</sup>Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 78.

kann entsprechend robust gegenüber Materialschwankungen sein, ein Produkt robust gegenüber Alterung oder Verschleiß. Seine Sichtweise führt schließlich zu Definition 2.2.2, die zunächst auch für diese Arbeit übernommen wird.

### **Definition 2.2.2.: Robustheit**

Die *Robustheit* eines Produktes unterstützt das Erreichen und/oder Aufrechterhalten seiner [...] Funktionen, oder produkt- und prozessbezogener Eigenschaften während es Gegenstand von Störgrößenexposition in verschiedenen Lebensphasen ist.

Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 76, übersetzt durch den Autor

□

TAGUCHI ET AL. (2005), S. 176 f. teilen den Entwicklungsprozess in Bezug auf die zur Steigerung der Robustheit erforderlichen Maßnahmen in drei Phasen ein:

- *System Design*  
Entspricht der Konzeptentwicklung nach VDI 22X,
- *Parameter Design*  
Festlegen der Design Parameter unter Berücksichtigung der größtmöglichen Schwankungen,
- *Tolerance Design*  
Festlegen der Restriktionen für Fertigungsprozesse.

TAGUCHI begreift das Robust Design vor allem als Optimierungsproblem, das in der Phase des Parameter Design gelöst wird. Die Zielgröße der Optimierung ist ein Zustand maximaler Qualität<sup>156</sup>. TAGUCHI modelliert Qualität dabei als eine vom Nutzer wahrgenommene Größe, die mit steigendem Abstand vom Idealwert quadratisch abnimmt und über die sogenannte *Quality Loss Function* beschrieben wird.<sup>157</sup> Dieser Ansatz setzt allerdings eine umfangreiche Datenbasis voraus. Entsprechend kann in frühen Phasen der Produktentwicklung, wo diese Datenbasis nicht vorhanden ist, auch kein Robust Design nach TAGUCHI stattfinden. Für den Bereich der statistischen Optimierung innerhalb des Parameter Design stehen umfangreiche Ansätze zur Verfügung. An dieser Stelle sei beispielhaft auf Methoden wie *Monte Carlo Simulationen*, oder *Design of Experiments* verwiesen.<sup>158</sup> ANDERSSON (1996)(1), S. 5 stellt die ausschließliche Anwendung von TAGUCHIS RD-Ansätzen in Frage und fokussiert im Sinne des *Frontloading* auf Methoden, die bereits in den frühen Phasen (Konzeptphase) und der Grobgestaltung eingesetzt werden können. Auch JUGULUM und FREY (2007), S. 139 f. stellen fest, dass die Mehrheit der Robust Design-Methoden erst in den späten Phasen der Produktentwicklung anwendbar sind, während die frühen Phasen, obwohl sie für die Produktentwicklung eine

---

<sup>156</sup>Nach DIN 55350-11 (2008), S. 18 ist *Qualität* definiert als der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt.

<sup>157</sup>Vgl. TAGUCHI ET AL. (2005), S. 175.

<sup>158</sup>Vgl. HASENKAMP ET AL. (2009), S. 646, oder auch JUGULUM und FREY (2007), S. 139 f.

hohe Bedeutung haben, selten adressiert werden. Für die weitere Arbeit fasst Definition 2.2.3 das Verständnis von *Robust Design-Methodik* wie folgt zusammen:

**Definition 2.2.3.: Robust Design Methodik**

Robust Design Methodik bezeichnet all diejenigen systematischen Bemühungen, die die Unempfindlichkeit eines technischen Systems gegenüber Unsicherheit zum Ziel haben. Grundlage der Bemühungen ist ein entsprechendes Unsicherheitsbewusstsein. Es werden alle Phasen der Produktentwicklung adressiert.

In Anlehnung an ARVIDSSON und GREMYR (2008), S. 23

□

### 2.2.3 Einsatz von Hilfsmitteln im Robust Design

Um Robustheit bei Lösungsvarianten zu betrachten, die sich nicht, oder nur teilweise, durch mathematische Gleichungen beschreiben lassen, führen mehrere Autoren *Prinzipien* als besonders geeignete Hilfsmittel an.<sup>159</sup> MATHIAS (2015) leistet mit seiner Arbeit in

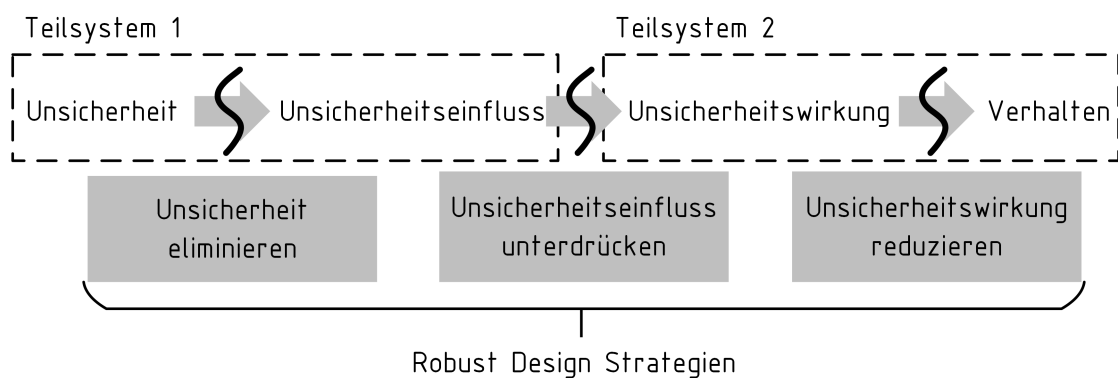


Abbildung 2.23: Robust Design Strategien nach Mathias.<sup>160</sup>

diesem Bereich einen Beitrag. Er stellt zur Synthese robuster Lösungen drei sogenannte *Robust Design Strategien* zur Verfügung, vgl. Abbildung 2.23. Die Strategie *Unsicherheit eliminieren* versucht das Streben des Entwicklers auf Maßnahmen zu lenken, die die Unsicherheit selber direkt reduzieren. Die Strategie *Unsicherheitseinfluss unterdrücken* lässt Unsicherheit zu, versucht jedoch durch zusätzliche Effekte oder Teilsysteme die Einwirkung der Unsicherheit auf das System zu verhindern bzw. zu verringern. Die Strategie *Unsicherheitswirkung reduzieren* unterstützt die Suche nach Produktlösungen, deren Funktionsweise unempfindlich gegenüber einer Unsicherheit ist.

Die Anwendung der Strategien lässt sich mit einem praktischen Beispiel aus dem Bereich Fahrzeugkomfort illustrieren. Bei Verwendung von handgeschalteten Getrieben kann es zu Vibrationen im Schaltsystem kommen, die unter Umständen den durch den

<sup>159</sup>Vgl. bspw. MATHIAS (2015), S. 27 f.

<sup>160</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach MATHIAS (2015), S. 107.

Fahrer wahrgenommenen Fahrkomfort beeinträchtigen.<sup>161</sup> Die zur Beurteilung des Fahrkomforts verwendete Größe ist die am Schaltknauf durch den Fahrer wahrnehmbare Beschleunigung, deren Grenzwert bei etwa  $2\text{ m/s}^2$  liegt.

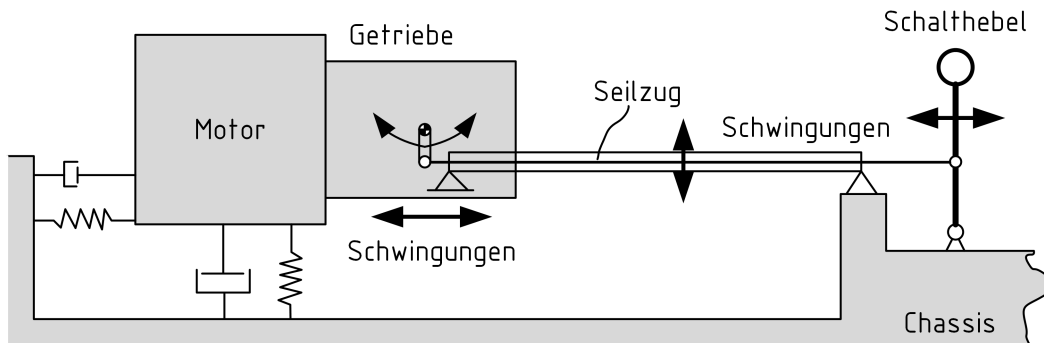


Abbildung 2.24: Vereinfachte Darstellung der externen Schaltung als schwingungsfähiges System.<sup>162</sup>

Abbildung 2.24 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines PKW als schwingungsfähiges System zur Untersuchung der externen Schaltung nach KIRCHNER (2007), S. 619. *Motor* und *Getriebe* bilden eine Einheit, die in Bezug auf das *Chassis* federnd gedämpft gelagert ist (horizontal und vertikal). Der *Schalthebel* ist ebenfalls mit dem *Chassis* verbunden. Der Stellweg des *Schalthebels* wird über einen *Seilzug* auf den getriebeseitigen *Schalthebel* übertragen. Auf ebendiesem Weg können jedoch auch Störgrößen wie beispielsweise Schwingungen übertragen werden.

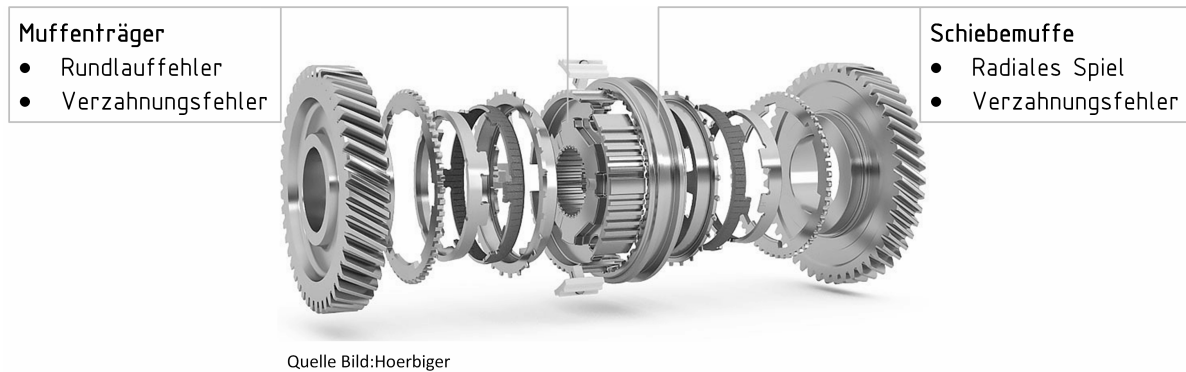


Abbildung 2.25: Beispielhafte Darstellung einer 2 Gang Synchronisationseinheit.

Ursache für diese Störgrößen sind Bewegungen der *Synchronisationsbauteile*, vgl. hierzu Abbildung 2.25. Die *Schiebemuffe* muss auf dem *Muffenträger* axial verschieblich sein,

<sup>161</sup>Vgl. KIRCHNER (2007), S. 618 f.

<sup>162</sup>Quelle: eigene, angepasste Darstellung nach KIRCHNER (2007), S. 619.

weshalb die beiden Bauteile in der Führung an den entsprechenden Wirkflächenpaaren mit Spiel gepasst werden. In Abhängigkeit vom jeweils vorliegenden *Ist-Maß* der Bauteile und dem Lastzustand, positioniert sich die Schiebemuffe im Rahmen des *Ist-Spiels*, wobei Rundlauffehler des Muffenträgers und Fehler in den Verzahnungen beider Bauteile ebenfalls Auswirkungen auf die Positionierung haben. In der Folge kann eine umlaufende Exzentrizität oder Schiefstellung der Schiebemuffe auftreten, die die Innenschaltung sowie die fahrzeugseitigen Komponenten der Schaltbetätigung zu Schwingungen anregen kann. Die Schwingungen im Seilzug teilen sich in einen longitudinalen und einen transversalen Anteil auf, die sich unterschiedlich auf den Fahrzeugkomfort auswirken. Der longitudinale Anteil ist wesentlich für die Schwingungen des Schaltknaufs in Schallrichtung verantwortlich. Der transversale Anteil führt unter Umständen zu Geräuschentwicklung im Seilzug.<sup>163</sup> Der Strategie *Unsicherheit eliminieren* folgend, müssen die Rundlauffehler vermieden werden. Dies ist beispielsweise durch eine hochpräzise Fertigung möglich, was jedoch sehr hohe Kosten mit sich bringt. Die Strategie *Unsicherheitseinfluss unterdrücken* zielt darauf ab das System so zu gestalten, dass Schwingungen sich nicht im System fortpflanzen können. Dies führt auf die Lösung des *Modulationshebels*, der durch gezieltes Einbringen von Elastomerfedern im Rotationsfreiheitsgrad und zusätzlicher Masse Schwankungen am Getriebeeingang kompensieren kann. Zusätzlich kann durch Verdrillen der Seilzüge Reibung erzeugt werden, die ebenfalls zur Dämpfung der Störgrößen beiträgt.<sup>164</sup> Die Strategie *Unsicherheitswirkung reduzieren* führt auf Lösungen, bei denen der Transferpfad zwischen Schalthebel und Getriebe unterbrochen ist. Dies ist beispielsweise bei *shift-by-wire Systemen* der Fall, allerdings auf Kosten anderer Nachteile.<sup>165</sup>

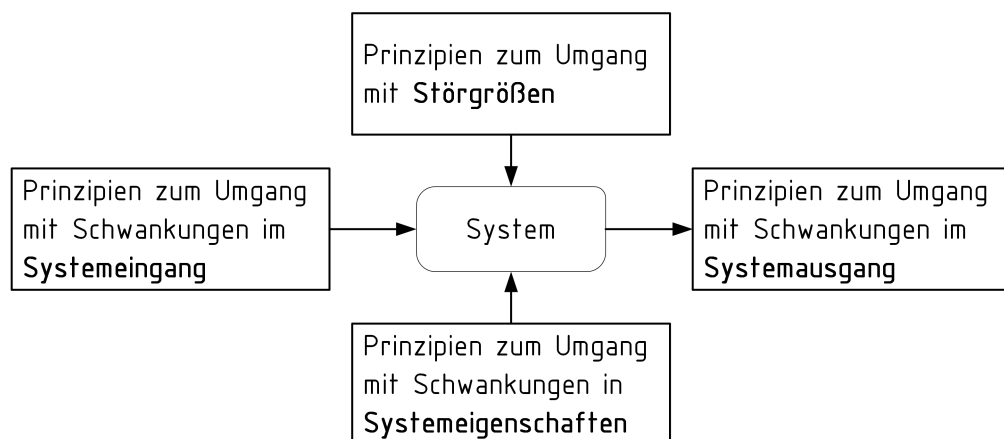


Abbildung 2.26: Klassifizierung von Prinzipien zur Erhöhung der Robustheit nach *Jugulum* und *Frey* auf Basis des *P Modells*.<sup>166</sup>

<sup>163</sup>Vgl. KIRCHNER (2007), S. 619.

<sup>164</sup>Vgl. KIRCHNER (2007), S. 622.

<sup>165</sup>Vgl. KIRCHNER (2007), S. 614.



JUGULUM und FREY (2007), S. 139 f. nutzen eine Schlagwortrecherche<sup>167</sup> in US-Patenten um robuste Produktlösungen zu finden. Auf Basis der Suchtreffer leiten sie insgesamt 19 Prinzipien ab, deren Einsatz die Robustheit von Konzeptvarianten erhöht. Die Prinzipien sind nach dem *P Modell* gegliedert, vgl. Abbildung 2.26, und werden dem Entwickler in Katalogform zur Verfügung gestellt.

ANDERSSON (1997)(1) sieht in Gestaltungsregeln und -prinzipien eine Möglichkeit die Entwicklung robuster Produkte bereits in der Konzeptphase qualitativ zu unterstützen, da dort noch zu wenige Daten zur Verfügung stehen, um rechnerische Aussagen über Robustheit ableiten zu können. Die Hauptaufgabe der Verwendung von Erfahrungswissen sieht er in der Analyse zur Evaluation von Lösungsvarianten. Eine Lösungsvariante wird demnach als robust bezeichnet, wenn die Grundregeln und Richtlinien erfüllt werden. Die vorgeschlagenen Regeln sind in der Hauptsache PAHL ET AL. (2007) und FRENCH (1994) entnommen, es wird jedoch explizit darauf verwiesen, dass die Liste nicht vollständig sei. MATTHIASSEN (1997) baut auf die Ergebnisse von ANDERSSON auf und ergänzt um weitere Prinzipien, wobei das Produkt immer im Zentrum des Interesses steht.

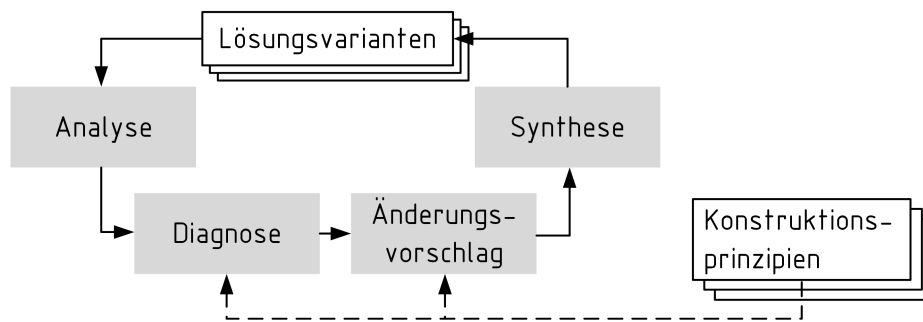


Abbildung 2.27: Vorgehensmodell zur Anwendung von Konstruktionshinweisen nach Matthiassen.<sup>168</sup>

Zusätzlich stellt MATTHIASSEN ein Vorgehensmodell zur Anwendung von Erfahrungswissen in der PE vor, dass er für die Anwendung im Robust Design für sinnvoll erachtet, vgl. Abbildung 2.27. Das Vorgehen ist insgesamt iterativ und von wechselnden Analyse- und Syntheseschritten geprägt, die jeweils durch Konstruktionshinweise unterstützt werden. Mit Hilfe der Konstruktionshinweise wird für jede Lösungsvariante eine Diagnose erstellt. Auf Basis der Diagnose kann im nächsten Schritt eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden, die auf die Synthese einer neuen Variante führt. Das Vorgehen ähnelt vom Grundgedanken dem Vorgehen zum taktischen Gestalten nach VDI2223, vgl. Abbildung 2.12, fokussiert jedoch explizit auf die Verwendung der Konstruktionshinweise.

<sup>166</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach JUGULUM und FREY (2007), S. 155.

<sup>167</sup>Schlagworte sind bspw. *robust*, *insensitiv* und *tolerant*

<sup>168</sup>Quelle: Eigene, durch den Autor übersetzte Darstellung nach MATTHIASSEN (1997), S. 98

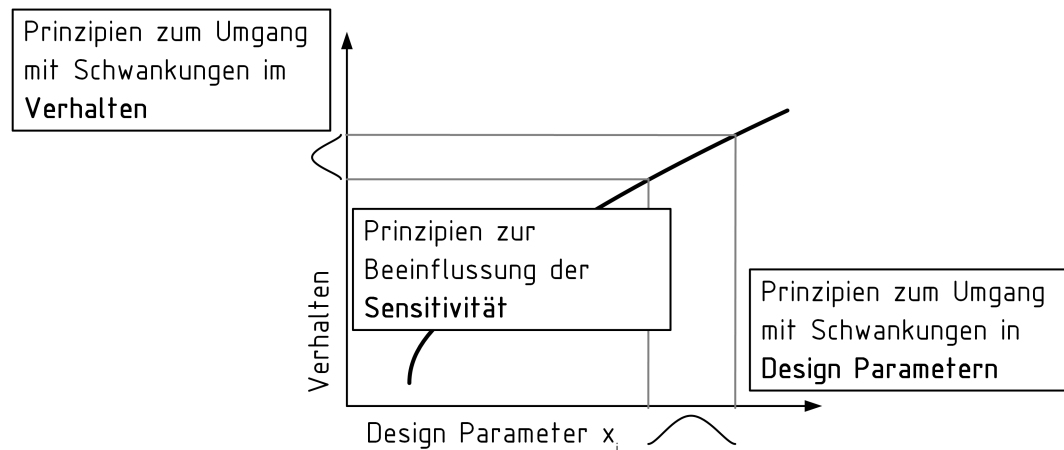


Abbildung 2.28: Wirkungsweisen im Robust Design nach Ebro.<sup>169</sup>

EBRO und HOWARD (2016) leiten aus den oben vorgestellten Veröffentlichungen den Bedarf einer Konsolidierung der vorhandenen und für das Robust Design als nützlich befundenen Prinzipien ab. Um die Wirkungsweise der untersuchten Prinzipien klassifizieren zu können, wird die *Transfer Function* verwendet, vgl. Abbildung 2.28. Auf Basis qualitativer Überlegungen wird bewertet, ob ein Prinzip eine der Wirkungsweisen aufweist. Es wird dabei unterschieden in *Umgang mit Schwankungen in Design Parametern*, *Umgang mit Schwankungen im Systemverhalten* und *Beeinflussung der Sensitivität*. Das Ergebnis sind insgesamt 15 Prinzipien, die mit der Reduktion von Schwankungen in Zusammenhang gebracht werden können. In einer weiteren Veröffentlichung unterscheidet HOWARD ET AL. (2017) zusätzlich in drei verschiedene Übertragungsfunktionen, die zusammen als *Variation Management Framework* bezeichnet werden. Dabei werden der Zusammenhang zwischen *Produktion* und *Design Parametern*, der Zusammenhang zwischen *Design Parametern* und der *technischen Funktion* des Produktes, sowie der Zusammenhang zwischen der *Funktion* und der *Kundenzufriedenheit* berücksichtigt.<sup>170</sup>

*Design for Six Sigma (DfSS)* ist eine Methodik auf Basis des Six Sigma-Konzepts, vgl. GAMWEGER (2009), die durch geeignete Entwicklungsprozesse, vgl. HASENKAMP (2010), S. 317, von Beginn der Entwicklung an auf die Vermeidung von Fehlern, Verschwendung und Iterationen fokussiert, vgl. CHOWDHURY (2002), S. 1-2. Dabei steht die Annahme im Mittelpunkt, dass 80 % der Qualitätsprobleme bereits in der Produktentwicklung durch die Gestalt festgelegt werden, vgl. CHOWDHURY (2002), S. 9. Allerdings fokussiert das *DfSS* auf die Entwicklungsprozesse und weniger auf spezifische Lösungen oder Prinzipien zur Erhöhung der Robustheit, vgl. EBRO und HOWARD (2016), S.

<sup>169</sup>Quelle: Eigene, abgeänderte, durch den Autor übersetzte Darstellung nach EBRO und HOWARD (2016), S.9

<sup>170</sup>Vgl. HOWARD ET AL. (2017), S. 5.

<sup>171</sup>Quelle: Eigene, abgeänderte, durch den Autor übersetzte Darstellung nach HOWARD ET AL. (2017), S.5

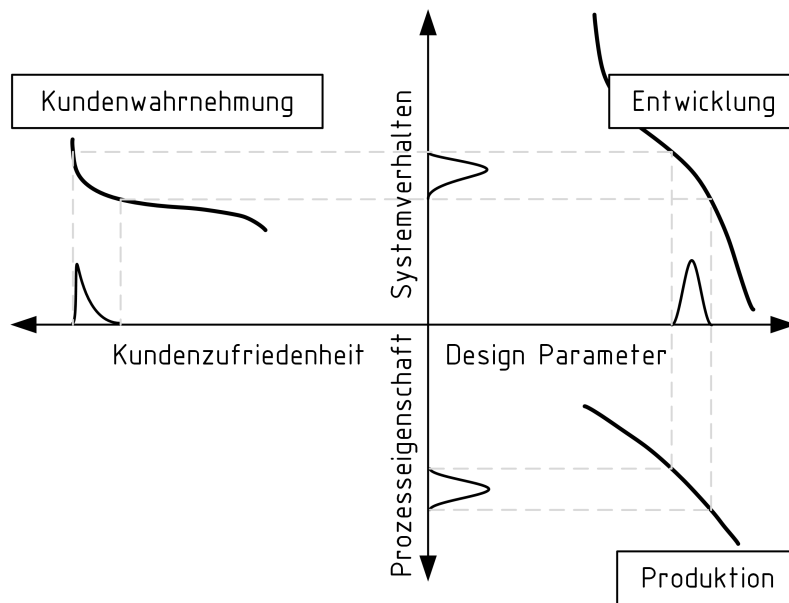


Abbildung 2.29: *Variation Management Framework* nach Howard.<sup>171</sup>

7. Damit ist das *DfSS* dem Namen nach eine *DfX Methodik*, inhaltlich jedoch von der sonstigen Verwendung dieser Begrifflichkeit her, vgl. Abschnitt 2.1.3, grundverschieden.

## 2.3 Zusammenfassung des Standes der Forschung

Abbildung 2.30 zeigt den Stand der Forschung klassifiziert nach *Modellen*, *Vorgehensweisen* und *Hilfsmitteln* mit ihren Zusammenhängen. Die allgemeine Produktentwicklung nach *VDI 22X* bietet ein Vorgehensmodell zur Einbindung von Konstruktionshinweisen in die Entwicklung. Dabei ist sie verknüpft mit dem Gedanken der *GPPE*, die über die *Theorie technischer Systeme* sowohl das Prozessmodell nach *Heidemann*, als auch *Produktmodelle* und die *Eigenschaftstheorie* inkludiert, vgl. Abbildung 2.30. Zusätzlich werden in der Arbeit von *Tekkaya* Konstruktionshinweise zur Unterstützung des *DfM* in die *GPPE* eingeordnet.

Auch das *P Modell* und die *Transfer Function* nutzen die *Eigenschaftstheorie*, indem *Design Parameter* von technischen Produkten erfasst werden.

Die *Transfer Function* dient, in den bisherigen Ansätzen zur Nutzung von Konstruktionshinweisen im Robust Design, zur Ableitung von *Robustheitskriterien*. Die hierdurch gewonnenen robustheitsförderlichen Hinweise werden im Vorgehensmodell von MATTHIASSEN (Hinweis Loop) im Entwicklungsprozess zur Verfügung gestellt.

Das im *SFB 805* erarbeitete Verständnis von *Unsicherheit* beruht auf der in der *GPPE* implementierten, ganzheitlichen Betrachtungsweise von Lebenslaufprozessen. Zur Abbildung von Unsicherheit in verketteten Prozessen wird das *SFB 805 Prozessmodell*

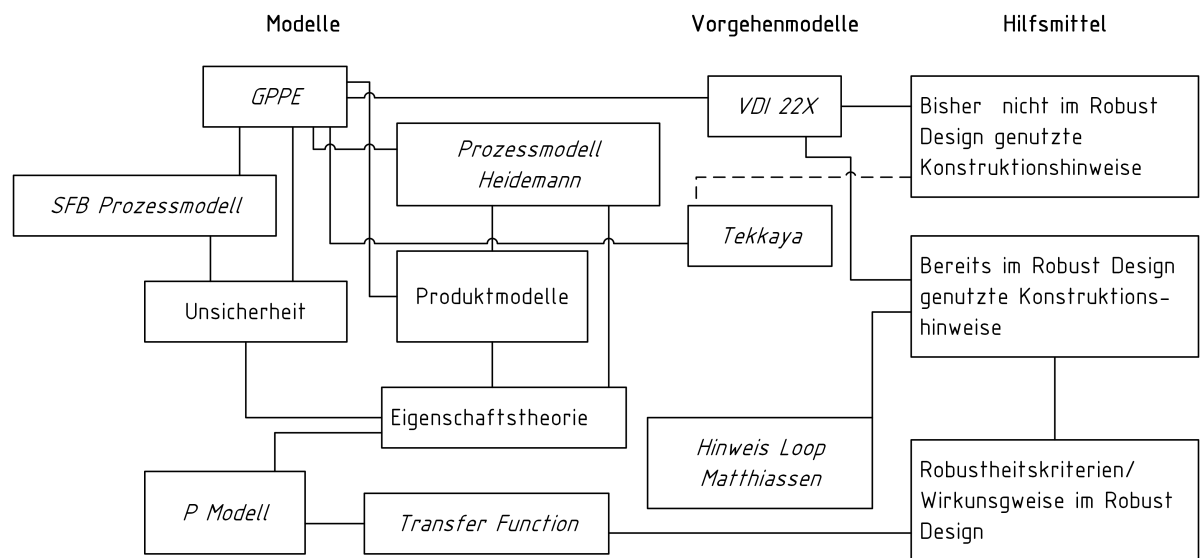


Abbildung 2.30: Zusammenfassung des Standes der Forschung.

verwendet, wobei auch hier eine formalisierte Beschreibung von Objekten mit Hilfe der Eigenschaftstheorie erfolgt.

### 3 Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit

Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass Forschungsbedarf bei den *qualitativen Methoden* zur Unterstützung der *frühen Phasen* der Produktentwicklung, vor allem in Bezug auf die *Synthese robuster Lösungsvarianten*, besteht. Einige Autoren schlagen daher den Einsatz von erfahrungsbasiert gewonnenem Wissen in Form von Konstruktionshinweisen vor. Diese Hinweise können durch die in ihnen gespeicherte Erfahrung, trotz unsicherer Informationslage in den frühen Phasen der Entwicklung, zur qualitativen Reduktion von Schwankungen verwendet werden, vgl. Abschnitt 2.2.3. Die vorhandenen Arbeiten zeigen die grundsätzliche Tauglichkeit der Anwendung von Konstruktionshinweisen im Robust Design auf. Eine umfassende Untersuchung der existierenden Konstruktionshinweise findet jedoch bisher nicht statt. Auch ANDERSSON (1996)(1), S.73 stellt bereits 1996 fest:

Another interesting project would be to design a tool for use of design principles in the form of an interactive database. The program should be structured in such a way that the engineering designer can present a problem and then get advice on how the problem can be resolved by means of application of appropriate design principles. *Acquisition of a large number of different design principles and the design of a suitable and user-friendly interface* constitute huge tasks.

Obwohl dieses Zitat älter als 20 Jahre ist und aktuelle Veröffentlichungen nach wie vor den Einsatz von Konstruktionshinweisen im Robust Design vorschlagen, sind die beiden wesentlichen adressierten Aufgaben bis heute offen. Die vorliegende Arbeit greift daher das Thema wieder auf. Das *Ziel* der Arbeit ist eine *Methode zur Beherrschung von Unsicherheit in technischen Systemen*, basierend auf geeigneten *Modellen, Vorgehensweisen* und *Hilfsmitteln*, vgl. Abbildung 3.1.

Aus dem Stand der Forschung lässt sich der grundsätzliche Forschungsbedarf mit Blick auf die Nutzung von Konstruktionshinweisen im Robust Design ableiten.

- Bisher existiert kein Systemmodell, dass alle zur Beherrschung von Unsicherheit benötigten Informationen enthält.
- Die bisher in Bezug auf ihre Eignung im Robust Design hin untersuchte Menge verfügbarer Konstruktionshinweise ist sehr gering.

- Bisher existiert kein konsolidiertes Vorgehen zur Verwendung von robustheitsförderlichen Konstruktionshinweisen in der PE.

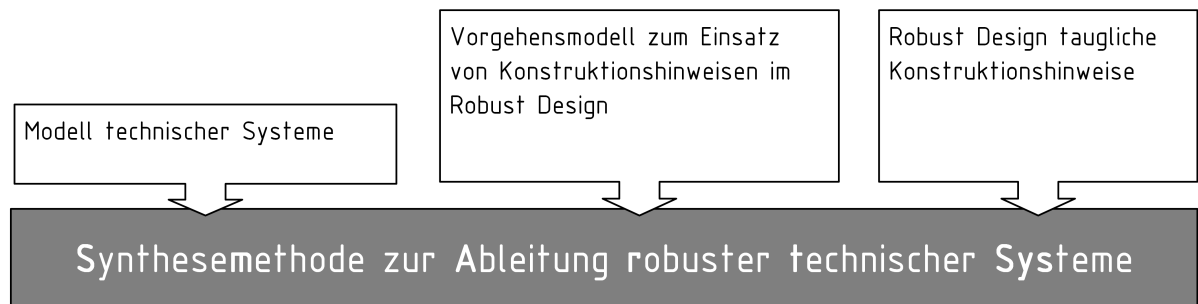


Abbildung 3.1: Elemente der *SmArtSys*.

Unsicherheit tritt in Prozessen auf und manifestiert sich in schwankenden Eigenschaften von Objekten. Technische Produkte werden als Mittel zum Zweck in Nutzungsprozessen eingesetzt, wobei über ihre Funktion die Wirkgröße bereitgestellt wird. Die Funktion eines technischen Produktes wird von seinen Objekteigenschaften festgelegt. Im technischen Produkt kumuliert also die Unsicherheit aus Werkstoffherstellung, Fertigung und Montage. Zusätzliche Unsicherheit tritt während der Nutzung auf. Abbildung

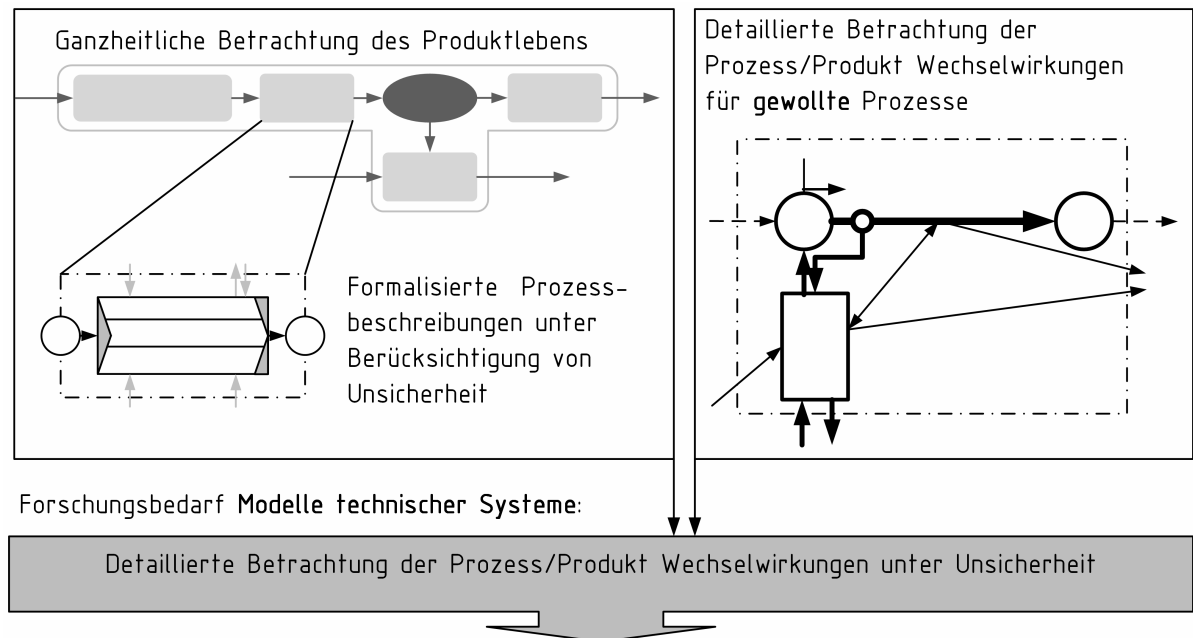


Abbildung 3.2: Forschungsbedarf in Modellen technischer Systeme

3.2 zeigt den Stand der Forschung in Bezug auf Modelle technischer Systeme. Im *SFB 805*

---

werden bereits verkettete Prozesse mit Systemmodellen abgebildet. Zusätzlich kann Unsicherheit verschiedenen Einflussgrößen zugeschrieben werden, die eine Identifikation von Unsicherheit erleichtern, vgl. Abbildung 3.2 links. Das *SFB 805 Prozessmodell*, vgl. S.41, ist sehr gut geeignet um die Verkettung von Unsicherheit in Prozessen abzubilden und nachzuvollziehen, erfasst jedoch die Wechselwirkungen zwischen technischem Produkt und Prozess nicht. Da Produktentwickler jedoch bei der Synthese die Eigenschaften des technischen Produktes gezielt festlegen, muss ein entsprechendes Modell technischer Systeme diese Wechselwirkungen abbilden können. Das Prozessmodell nach *Heidemann*, vgl. Abbildung 3.2 rechts, erfüllt diese Anforderung und hat sich zusätzlich vielfach bewährt. Allerdings handelt es sich um ein Modell, das zunächst nur zur Abbildung der Nutzungsphase entwickelt wurde. Die mit dem Modell einhergehende Prozessdefinition, vgl. Definition 2.1.6, weist explizit auf die Zweckdienlichkeit des Prozesses in Form einer gewollten Zustandsänderung hin. Diese Definition kann für Unsicherheit nicht gelten, da auch ungewollte Ereignisse wie bspw. Alterung und Verschleiß betrachtet werden müssen. Zusätzlich wird Unsicherheit bisher nicht im Modell von *Heidemann* berücksichtigt. Das *P Modell* dient der Identifikation von Einflussgrößen, es stellt jedoch weder eine Möglichkeit zur verketteten Erfassung von Prozessen, noch eine differenzierte Modellierung des technischen Produktes dar.

Es bedarf also eines Modells, dass auf Basis des *SFB 805*-Unsicherheitsverständnisses die formalisierte, verkettete Abbildung von allen Prozessen entlang des Produktlebens ermöglicht, wobei explizit die Erfassung von Produkt-Prozesszusammenhängen möglich ist.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit liegt entsprechend darin, im Bereich der Systemmodelle einen wesentlichen Beitrag zu leisten.

Im Robust Design werden bisher nur wenige der insgesamt sehr großen Anzahl an verfügbaren Konstruktionshinweisen verwendet. Forschungsbedarf besteht also in der Identifikation von weiteren, die Robustheit eines technischen Systems unterstützenden, Konstruktionshinweisen. Hierfür muss zunächst aus der Literatur eine große Menge von allgemeinen Konstruktionshinweisen ermittelt werden. Die Tauglichkeit der einzelnen Konstruktionshinweise für den Einsatz im Robust Design muss auf Basis von *Robustheitskriterien* bewertet werden. EBRO und HOWARD (2016) nutzen erfolgreich die *Transfer Function* zur deduktiven Einstufung von Hinweisen, vgl. Abbildung 3.4 links. Da die *Transfer Function* jedoch nur den Zusammenhang zwischen Objekteigenschaften und dem Produktverhalten darstellt, können komplexe Produkt-Prozesszusammenhänge bisher nicht abgebildet werden. Für die Verortung von Unsicherheit bedarf es zusätzlich einer prozeduralen Modellierung. Das Ziel muss es also sein, die verschiedenen RD-Wirkungsweisen aus der Literatur im Modell technischer Systeme zu konsolidieren. Als Vorbild hierfür kann die Ableitung der *Robust Design Strategien*, vgl. Abschnitt 2.2.3, aus dem Produktverhalten dienen.<sup>1</sup> Dieser Ansatz betrachtet, ebenso wie die *Transfer Function*, jedoch bisher nur das technische Produkt.

---

<sup>1</sup>Vgl. MATHIAS (2015), S. 107.

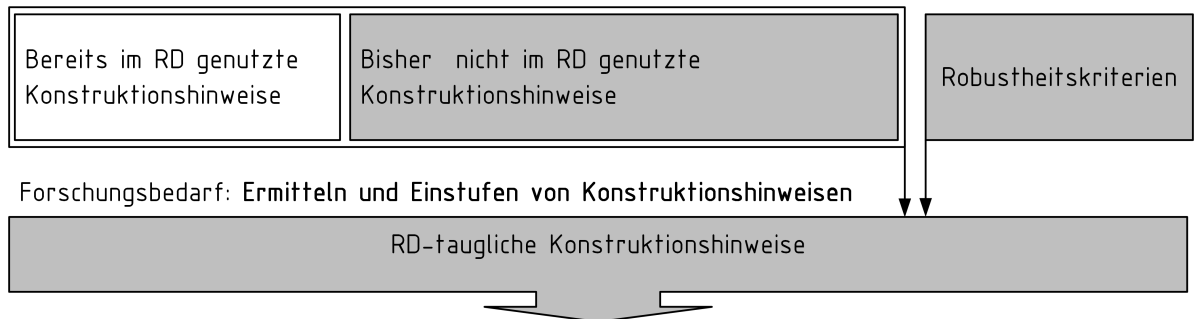


Abbildung 3.3: Forschungsbedarf zur Identifikation robustheitsförderlicher Konstruktionshinweise.

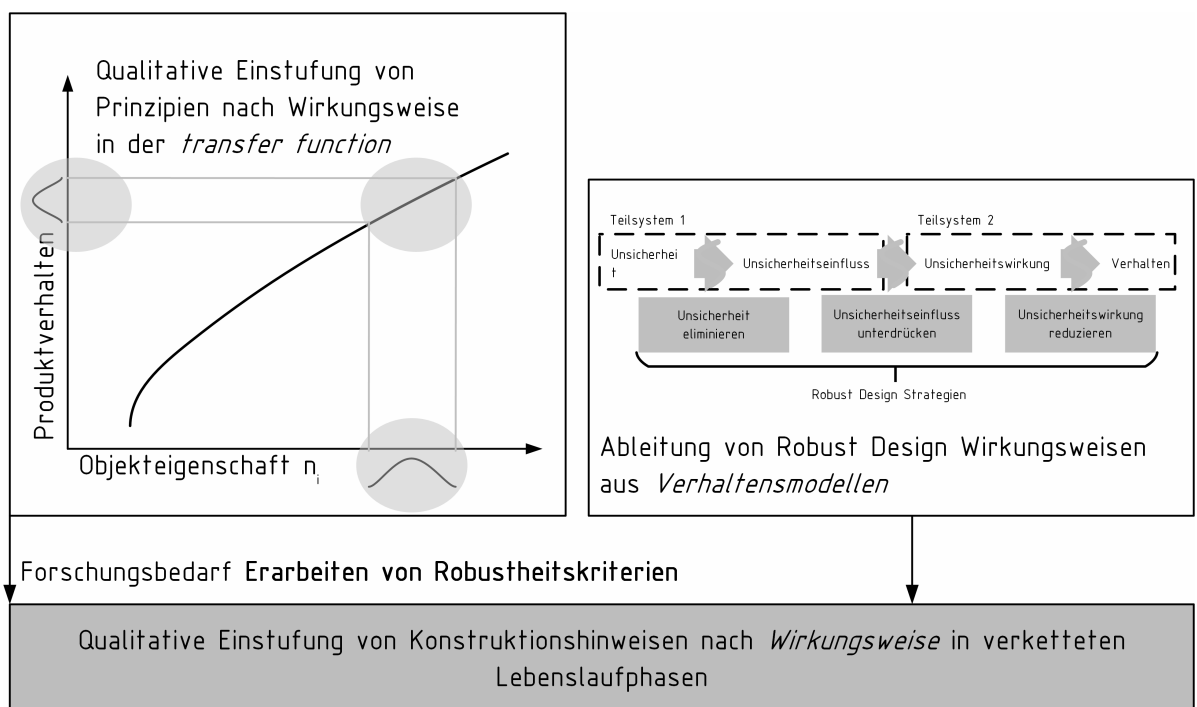


Abbildung 3.4: Forschungsbedarf bei der Ableitung von Robustheitskriterien für die Einstufung von Konstruktionshinweisen.



Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Menge an, für das Robust Design verwendbaren, Konstruktionshinweisen wesentlich zu vergrößern. Hierfür muss eine umfassende Literaturrecherche sowohl die bereits im Robust Design verwendeten, als auch die bisher nicht berücksichtigten Konstruktionshinweise identifizieren. Durch den Abgleich mit Robustheitskriterien können dann die insgesamt RD-tauglichen Konstruktionshinweise ermittelt werden. Die Ableitung der Robustheitskriterien erfolgt in Anlehnung an bereits existierende Ansätze, die vorliegende Arbeit leistet hier also einen Beitrag in Form von Weiterentwicklung.

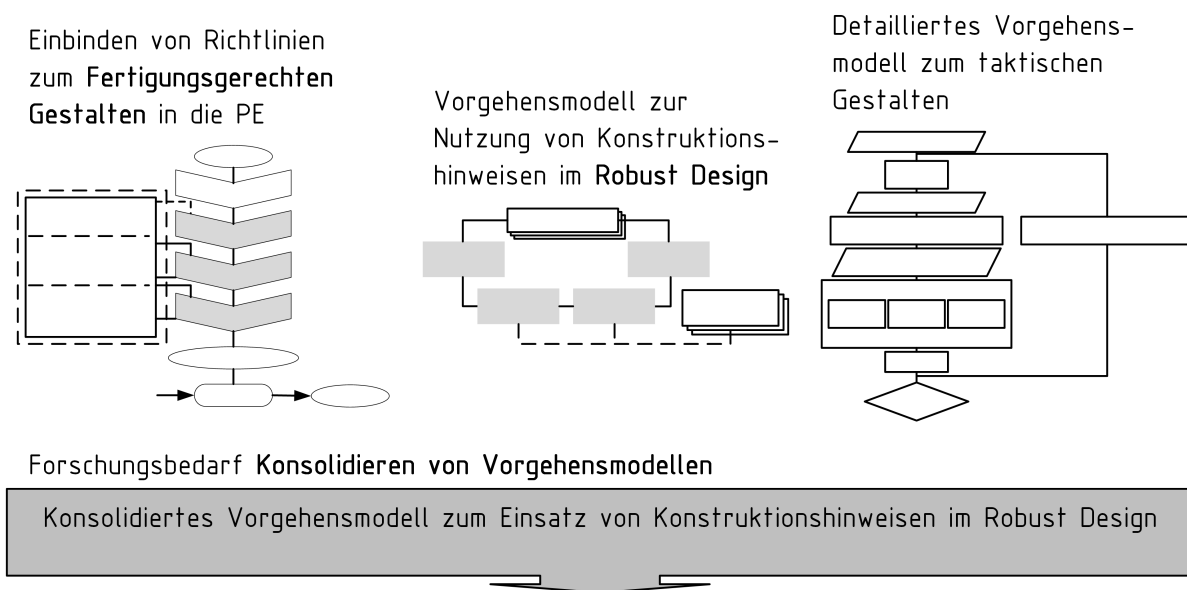


Abbildung 3.5: Forschungsbedarf bei Vorgehensmodellen zur Anwendung im Robust Design.

Zum Einsatz von Konstruktionshinweisen in der Entwicklung bedarf es eines geeigneten Vorgehensmodells. Der Stand der Forschung zeigt, dass verschiedene Modelle zur Verfügung stehen, die jedoch alle unterschiedliche Aspekte adressieren, vgl. hierzu Abbildung 3.5. Die VDI 2223 enthält das detaillierteste Vorgehensmodell, welches jedoch bisher nicht auf die Anwendung im Robust Design übertragen wurde. TEKKAYA ET AL. ordnen Konstruktionshinweise zum fertigungsgerechten Konstruieren in die *GPPE* ein, vgl. Abschnitt 2.1.3, übertragen dieses Vorgehen jedoch nicht auf andere Konstruktionshinweise. MATTHIASSEN stellt schließlich ein einfaches Modell zur Nutzung von Konstruktionshinweisen im Robust Design vor, vgl. Abschnitt 2.2.3.

Der Forschungsbedarf besteht entsprechend in der Konsolidierung der vorhandenen Vorgehensweisen. Der Beitrag dieser Arbeit beschränkt sich hierbei auf eine Übertragung der vorhandenen Modelle auf die Anwendung im Robust Design.

# 4 Erarbeiten der zentralen Modelle

## 4.1 Modell technischer Systeme

Aus dem Forschungsbedarf geht hervor, dass zur Abbildung von Prozessen im Kontext der Beherrschung von Unsicherheit ein Modell technischer Systeme benötigt wird. Die Anforderungen an das Modell sind hierbei wie folgt:

- Beschreibung aller *gewollten* und *ungewollten* Prozesse im Lebenslauf technischer Systeme,  
bisher werden nur gewollte Prozesse betrachtet.
- Betrachtung *gewollter* und *ungewollter* Wirkungen im technischen Produkt,  
bisher wird mit der Funktion des technischen Produktes nur die gewollte Wirkung betrachtet.
- Verkettete, durchgängige Beschreibung unsicherer Prozesse im Produktlebenslauf, wie im *SFB 805*-Unsicherheitsverständnis verankert.
- Detaillierte Verortung von Unsicherheit im technischen System,  
bisher findet lediglich eine übergeordnete Zuordnung von Unsicherheit zum Gesamtprozess statt.
- Detaillierte Abbildung der Produkt-Prozess-Zusammenhänge,  
bisher wird im Kontext von Unsicherheit keine Wechselwirkung zwischen Produkt und Prozess berücksichtigt.
- Beschreibung gekoppelter Prozesse,  
bisher existiert kein Systemverständnis in dem gewollte und ungewollte Prozesse verkoppelt abgebildet werden.

Die im Stand der Forschung vorgestellten Prozessmodelle bilden ausschließlich *gewollte* Prozesse ab. Unter Unsicherheit kann die zugrundeliegende Prozessdefinition und damit das Prozessverständnis jedoch nicht aufrechterhalten werden, da die in Prozessen auftretende Zustandsänderung in Definition 2.1.6 als *zweckdienlich* bezeichnet wird. Die Wirkung von Unsicherheit in technischen Systemen kann jedoch auch *ungewollte* Zustandsänderungen hervorrufen. Ein Beispiel hierfür sind Alterungsprozesse bei Elastomerfedern, deren Beschreibung als Prozess bisher nicht möglich ist. Entsprechend wird aufbauend auf Definition 2.1.6 für die vorliegende Arbeit Definition 4.1.1 eingeführt, die das Verständnis von Prozessen zweckmäßig erweitert.

**Definition 4.1.1.: Prozess**

Ein Prozess beschreibt die Zustandsänderung eines Objektes in einem Zeitintervall, indem eine Menge von Objektzuständen in einer zeitlichen Abfolge betrachtet wird. Die Objektzustände werden durch ihre Eigenschaften beschrieben, wobei die Auswirkung von Unsicherheit in Form von Schwankungen in den Eigenschaften berücksichtigt wird.

□

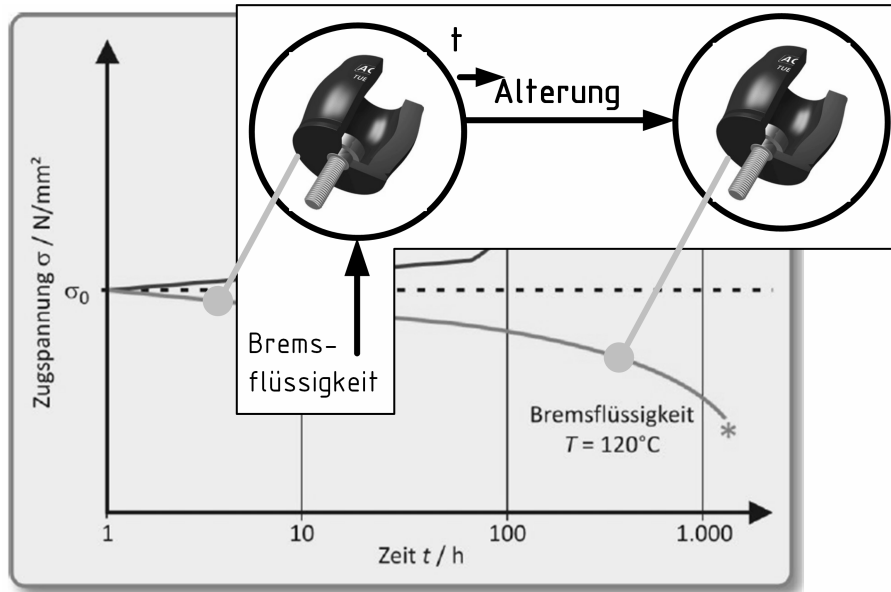


Abbildung 4.1: Alterung von Elastomerfedern durch Kontakt mit Bremsflüssigkeit.<sup>1</sup>

Durch Definition 4.1.1 steht damit erstmals ein im Kontext von Unsicherheit konsistentes Begriffsverständnis zur Verfügung, dass auf das Verständnis des *SFB 805* aufbaut, vgl. die Arbeitshypothese des *SFB 805*, und dieses konsequent weiterführt.

Die als Beispiel genannte Alterung von Elastomerfedern kann nun als Prozess aufgefasst werden, bei dem die Störgröße *Bremsflüssigkeit* eine zeitliche Veränderung der Eigenschaften der Elastomerfeder bewirkt, vgl. Abbildung 4.1. Die *Störgröße* wird als *Wirkgröße* aufgefasst. Das Diagramm zeigt die sich bei einer aufgebrachten Dehnung von 20 % einstellende Zugspannung  $\sigma$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ . Der Verlauf zeigt ein ausgeprägtes *Relaxationsverhalten*, da die *Störgröße Bremsflüssigkeit* die chemischen Bindungen im Elastomer schrittweise auflöst und damit eine Abnahme der Steifigkeit über der Expositionsdauer bewirkt.<sup>2</sup>

Der Fokus der Produktmodelle, vgl. Abschnitt 2.1.2, liegt auf der *Funktion* des technischen Produktes und damit gemäß Definition 2.1.4 auf dem *gewollten Zusammenhang*

<sup>1</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SPITZ (2012), S. 21. Bildquelle *Elastomerfeder*: KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 287.

<sup>2</sup>Vgl. SPITZ (2012), S. 21.

zwischen *Ein-* und *Ausgangsgrößen*. Für die Berücksichtigung von Unsicherheit reicht eine rein funktionale Betrachtung jedoch nicht mehr aus, da auch ungewollte Zusammenhänge im technischen Produkt berücksichtigt werden müssen. Mit Definition 2.1.5 wird der *reale*, gemessene Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen in Abgrenzung zur *Funktion* eingeführt. Diese Definition berücksichtigt zwar Unsicherheit, jedoch erst am realen, physischen System. Zur Entwicklung robuster Systeme muss Unsicherheit jedoch bereits während der Entwicklung berücksichtigt werden. Aufbauend auf Definition 2.1.4 und Definition 2.1.5 wird mit Definition 4.1.2 folgendes Verständnis festgelegt:

**Definition 4.1.2.: Verhalten**

Das Verhalten ist die Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eines technischen Systems unter Unsicherheit.  $\square$

Das *Verhalten* beschreibt also die Funktionserfüllung des technischen Produktes unter Unsicherheit. Damit entspricht das Verhalten dem im englischsprachigen Raum verwendeten Begriff *performance* als Maß zur Beschreibung und Beurteilung von Robustheit in der *Transfer Function*, vgl. Abschnitt 2.2.2.

Wie schon im Motivationsbeispiel auf S.3 aufgezeigt und im *SFB 805* Grundverständnis verankert, muss Unsicherheit immer in Bezug zu allen auftretenden Teilprozessen des Produktlebenslaufes betrachtet werden. Entsprechend müssen alle auftretenden Teilprozesse auch verkettet erfasst werden können. Im Beispiel des Zündschlosses führt die *Kombination* aus *Schwankungen* einzelner Bauteile aus der *Fertigung* zusammen mit Schwankungen aus dem *Nutzungsprozess* gemeinsam zum Versagen des Systems. Die formalisierte Beschreibung der Teilprozesse über generische Prozessmodelle und die formalisierte Abbildung von Objekten mit Hilfe von unsicheren Eigenschaften ermöglicht die durchgängige Erfassung aller Teilprozesse und damit auch die durchgängige Erfassung von Schwankungen und muss auch im neuen, detaillierten Modell technischer Systeme gewährleistet sein.

Abbildung 4.2 zeigt zur Illustration ein Beispiel für verkettete Teilprozesse. In der Produktion wird ein Halbzeug mit Hilfe einer Werkzeugmaschine in ein fertiges Bauteil überführt. Das Bauteil ist hierbei der *Operand* im Prozess, es wird also gewollt verändert. Der Prozess läuft jedoch unter Einfluss von Unsicherheit ab. Im Beispiel können dies Störgrößen wie Temperaturschwankungen ebenso wie Verschleiß am Drehwerkzeug der Drehmaschine sein. Im Endzustand des Produktionsprozesses wird das Bauteil durch seine Eigenschaften beschrieben, wobei in diesen die Auswirkung von Unsicherheit im Prozess in Form von Schwankungen abgebildet wird. Während der Nutzung hat das technische Produkt die Rolle des *Operators* inne, das heißt es bewirkt selbst die Zustandsänderung eines *Operanden*. Das technische Produkt ist nun durch die kumulierte Unsicherheit aus der Produktion bereits unsicherheitsbehaftet, was sich in Form schwankender Wirkgrößen auf den Prozess und damit auf den angestrebten Endzustand (Zweck) des Nutzungsprozesses auswirkt. Zusätzlich ist auch die Nutzung als Prozess unsicher-

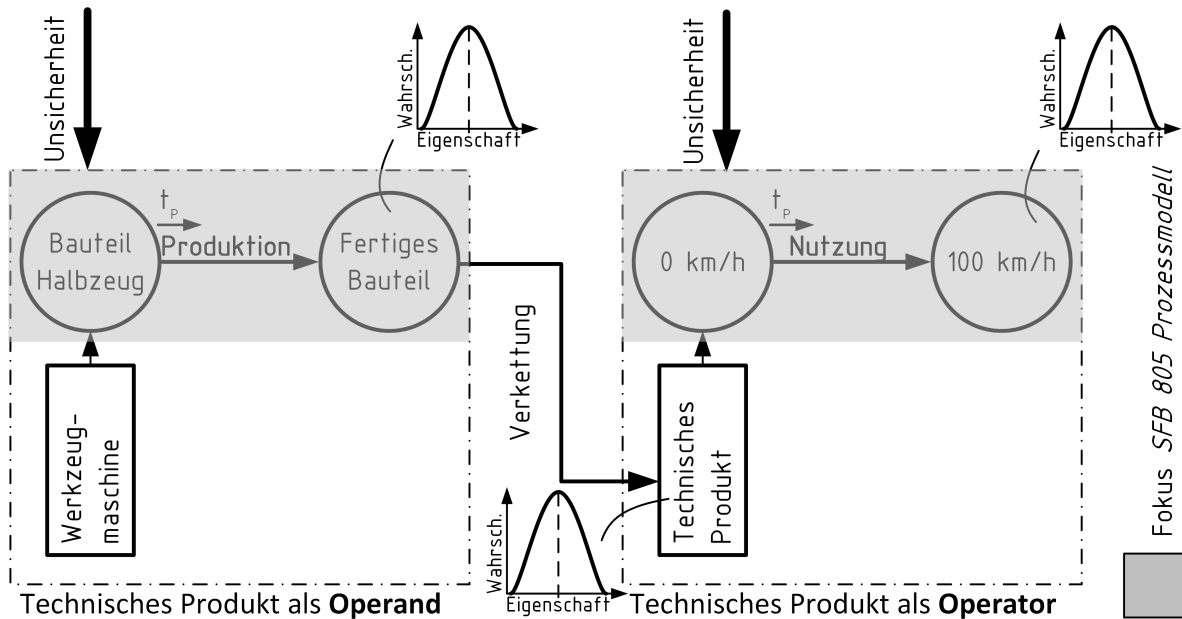


Abbildung 4.2: Fortpflanzung von Unsicherheit in verketteten Prozessen.

heitsbehaftet. Im Beispiel aus Abbildung 4.2 kann bspw. Nässe auf der Fahrbahn als Störgröße für die Beschleunigung des Fahrzeuges von 0 km/h auf 100 km/h wirken und zu Schwankungen in der Dauer des Prozesses führen.

Aus Abbildung 4.2 wird auch deutlich warum das *SFB 805 Prozessmodell*, vgl. Abbildung 4.3, zur Synthese robuster technischer Systeme nicht ausreicht: Es bildet nur die Prozesse und damit die Unsicherheit im Produktleben ab, der Fokus einer Produktentwicklung liegt jedoch auf dem technischen Produkt. Es muss also möglich sein das technische Produkt über alle Teilprozesse des Produktlebens hinweg zu modellieren und dabei die Wechselwirkung zwischen Operatoren, Operanden und der Umwelt zu erfassen. Das *Prozessmodell nach Heidemann*, vgl. S.23, erfüllt diese Anforderungen, allerdings wird Unsicherheit, in der Form wie sie im SFB 805 Prozessmodell in Form der vier Kategorien *Störgröße*, *Ressource*, *Information* und *Mensch* erfasst wird, bisher nicht im Modell von *Heidemann* berücksichtigt. Gelingt es diese Kategorien in das Modell von *Heidemann* zu überführen, ist der Zusammenhang von *Unsicherheit*, *Prozessen* und *technischen Produkten* hergestellt, der zur Entwicklung robuster Systeme benötigt wird.

Abbildung 4.3 zeigt das *SFB 805 Prozessmodell* und das *Prozessmodell nach Heidemann* im direkten Vergleich. *Störgrößen* werden bereits im *Prozessmodell nach Heidemann* berücksichtigt, wobei auch die sogenannten *Nebengrößen* als Störgrößen wirksam werden können. Die Unsicherheitskategorie *Mensch* kann bisher nur eingeschränkt im Prozessmodell nach Heidemann abgebildet werden, da dort nur der *Anwender* berücksichtigt wird. Die Unsicherheitskategorie *Mensch* erfasst jedoch alle Wirkungen menschlichen

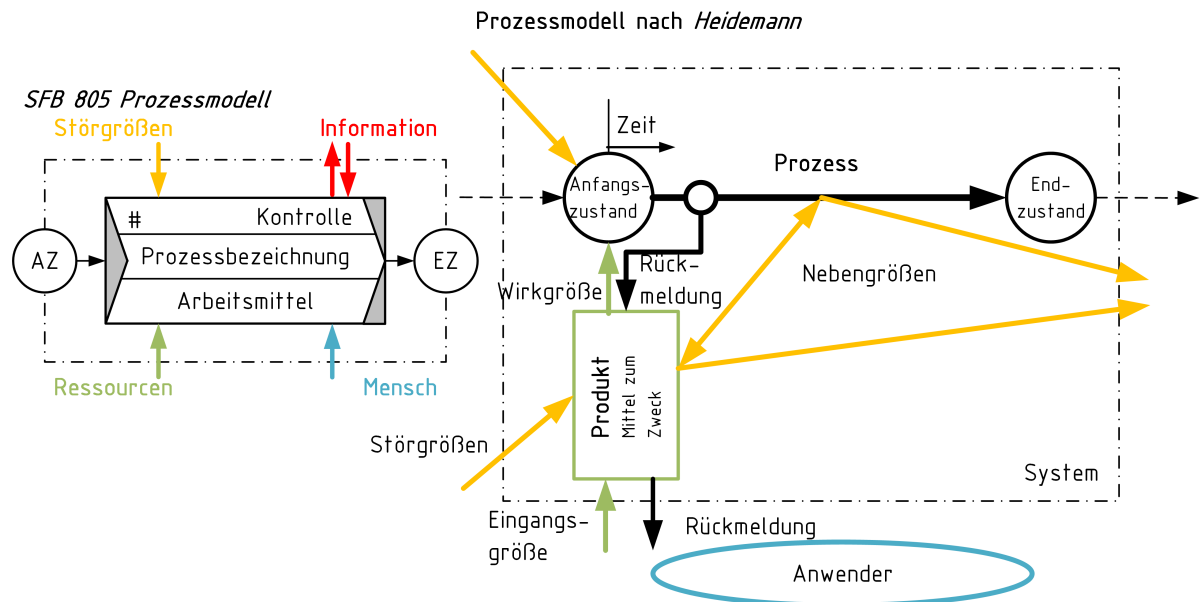


Abbildung 4.3: Verortung der vier Kategorien von Unsicherheit aus dem *SFB 805 Prozessmodell* im *Prozessmodell nach Heidemann*.

Ursprungs auf das technische System. Ressourcen werden im *Prozessmodell nach Heidemann* bereits deutlich differenzierter erfasst als im *SFB 805 Prozessmodell*. Die entsprechende Unsicherheit kann direkt im Modell nach *Heidemann* verortet werden. Lediglich die Unsicherheit in *Information* kann nicht direkt im Modell zugeordnet werden. Allerdings ist Unsicherheit gemäß Definition 2.2.1 ohnehin bereits an den Mangel an Information geknüpft und damit bereits in den restlichen drei Kategorien verortet. Damit kann festgehalten werden, dass grundsätzlich eine zur Unsicherheitsbetrachtung im *SFB 805* konsistente Modellierung der Unsicherheitskategorien im detaillierten Prozessmodell nach *Heidemann* möglich ist.

Die bisherige Betrachtung von Prozessen im Lebenslauf technischer Systeme modelliert das technische Produkt entweder in der Rolle des *Operanden*, oder in der Rolle des *Operators*, vgl. Abbildung 4.2. Besonders während der Nutzungsphase treten diese beiden Prozessformen jedoch häufig gleichzeitig auf und sind zusätzlich rekursiv miteinander gekoppelt. Um das Systemverhalten als Ganzes verstehen zu können, ist es also notwendig beide Systeme in ihrem Zusammenhang zu verstehen. Abbildung 4.4 illustriert das parallele Auftreten von Prozessen mit dem technischen Produkt in der Rolle als Operator (links) und der Rolle als Operand (rechts) am Beispiel eines *Drehprozesses*. Der Nutzungsprozess *Welle drehen* wird mit der Drehmaschine als Operator ausgeführt. Die Wirkgröße für den Prozess stellt die Drehmaschine in Form der Schnittkraft am Schneidkeil zur Verfügung, wodurch die Zustandsänderung der Welle herbeigeführt wird. Der Schnittkraft wirkt jedoch eine entgegengesetzt gleich große Rückwirkung entgegen, die den Schneidkeil belastet. Diese Rückwirkung kann nun als Wirkgröße eines parallel zum

Nutzungsprozess der Drehmaschine auftretenden Verschleißprozesses<sup>3</sup> führen, bei dem der Zustand der Drehmaschine, genauer gesagt der Geometrie des Schneidkeils, verändert wird. Eine Änderung dieser Geometrie, bspw. eine Erhöhung des Schneidkeilradius, bewirkt bei unverändertem Vorschub eine Erhöhung der Schnittkraft des Drehprozesses und hat erheblichen Einfluss auf die erreichbare Oberflächenqualität des Schnittgutes.<sup>4</sup> Die Veränderung des Operators führt also zu Schwankungen im Ergebnis des Nutzungsprozesses und ist damit Ursache für Unsicherheit. Im Modell technischer Systeme können grundsätzlich alle Störgrößen, Nebengrößen und Rückwirkungen aus dem Prozess als Wirkgrößen für gekoppelte Parallelprozesse fungieren, wobei unterschieden werden muss, ob der Parallelprozess direkt an den Einsatzprozess gekoppelt ist, oder von äußeren Wirkgrößen abhängt.

Technisches Produkt als **Operator** und **Operand**

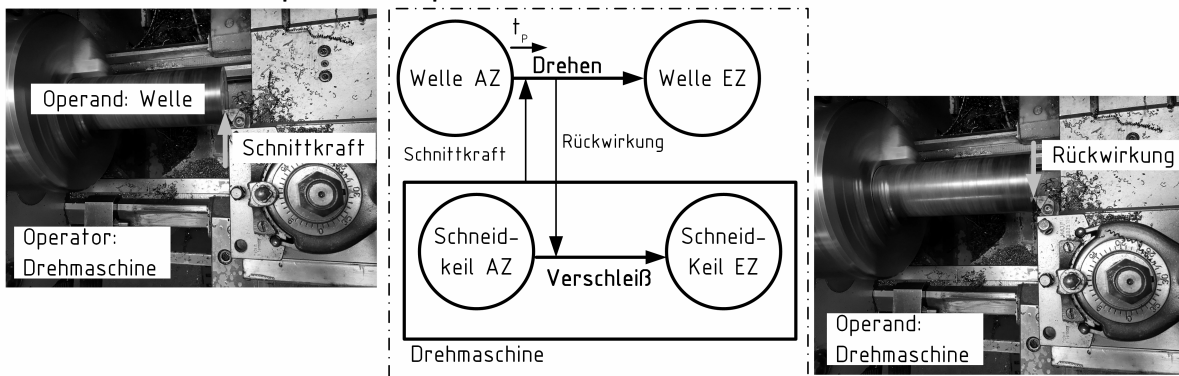


Abbildung 4.4: Parallele Prozesse mit dem technischen Produkt als Operand und Operator.

**Kopplung durch Rückwirkungen und Störgrößen aus Nebengrößen** Der Zustand des technischen Produktes ist, wie im Beispiel aus Abbildung 4.4 gezeigt, abhängig vom Einsatzprozess *Drehen*. Ohne diesen Einsatzprozess gibt es keine Rückwirkung und damit auch keine Wirkgröße für den Verschleißprozess. Gleiches gilt für Störgrößen aus Nebengrößen. Beim Drehen entsteht durch Reibung am Schneidkeil eine hohe thermische Last, die als Störgröße den Verschleiß der Schneide bewirken kann. Der kumulierte Gesamtzustand des technischen Produktes hängt also von der Intensität der einzelnen Rückwirkung und Nebengrößen und der Dauer der einzelnen Einsatzprozesse ab.

**Kopplung durch Störgrößen von außen** Störgrößen von außen sind in Bezug auf ihr Auftreten nicht an den Einsatzprozess gekoppelt, ihr Auftreten hat seinen Ursprung in

<sup>3</sup> *Verschleiß* bezeichnet den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Vgl. KLOCKE und KÖNIG (2008), S. 75.

<sup>4</sup> Vgl. KLOCKE und KÖNIG (2008), S. 73f.

anderen Prozessen außerhalb des Systems. Sonneneinstrahlung ist bspw. eine solche externe Störgröße. Ihr Ursprung liegt außerhalb des technischen Systems und ist bezüglich ihres Auftretens als Resultat von chemischen Umwandlungsprozessen der Sonne unabhängig vom betrachteten technischen System. Allerdings können externe Störgrößen als Wirkgrößen das Arbeitsmittel verändern, also Zustandsänderungen des Arbeitsmittels bewirken, die sich in der Folge auf die durch das Arbeitsmittel erzeugten Wirkgrößen auswirken. Das klassische Robust Design (RD) beschäftigt sich mit der Beherrschung der reversiblen Auswirkungen von Störgrößeneinwirkungen, bspw. Wärmedehnung infolge Wärmestrahlung. Zur Beschreibung dieser Effekte reicht meist eine kausale Betrachtung. Allerdings muss zur vollständigen Erfassung aller Einflüsse auch die Zustandsänderung betrachtet werden, wie sie durch Effekte entsteht, deren Betrachtung vorwiegend zeitlich vorgenommen wird, bspw. bei Alterungsprozessen. Die Auftretensdauer und Intensität von Störgrößen kann unabhängig von den Einsatzprozessen sein. Entsprechend müssen zur Modellierung der Prozesse mit externen Störgrößen als Wirkgrößen die Expositionsdauern berücksichtigt werden. Damit müssen auch Lagerungs- und Stillstandszeiten betrachtet werden. Ein Beispiel aus dem Alltag ist die Alterung von Autoreifen und die hieraus entstehende Auswirkung auf den Nutzungsprozess *Auto fahren auf nasser Fahrbahn*. Im *VW-Handbuch* für den *Golf 6* steht bspw.: „Reifen altern durch physikalische und chemische Prozesse, wodurch ihre Funktion beeinträchtigt werden kann. Reifen, die längere Zeit unbenutzt lagern, verhärten und verspröden schneller als Reifen die ständig am Fahrzeug im Einsatz sind. Es wird empfohlen, Sommer- und Winterreifen, die älter als 6 Jahre sind, nicht mehr zu verwenden. Die ursprünglichen Eigenschaften reduzieren sich durch den Alterungsprozess. Besonders bei Winterreifen nehmen die Hafteigenschaften ab!“

Auf Basis des erweiterten Prozessverständnisses, vgl. Definition 4.1.1, und des erweiterten Verständnisses vom Verhalten technischer Produkte, vgl. Definition 4.1.2, ist es möglich die ganzheitliche Betrachtungsweise des Produktlebens und das Verständnis von Unsicherheit inklusive ihrer Repräsentation in Modellen technischer Systeme des *SFB 805* zusammen mit dem Prozessmodell von *Heidemann* in ein detailliertes Systemmodell zur Abbildung von Prozessen unter Berücksichtigung von Unsicherheit zu überführen, vgl. Abbildung 4.5. Alle Objekte im Modell technischer Systeme (MTS) werden formalisiert durch ihre Eigenschaften beschrieben, die Schwankungen berücksichtigen. Auf Basis der MTS können nun alle Prozesse des Produktlebens abgebildet und verknüpft werden. Die Wechselwirkungen zwischen Unsicherheit in Prozessen und dem technischen Produkt können mit Hilfe des MTS detailliert verstanden werden. Auch die Zusammenhänge zwischen gewollten und ungewollten Prozessen sind mit besonderem Blick auf Unsicherheit beschreibbar.



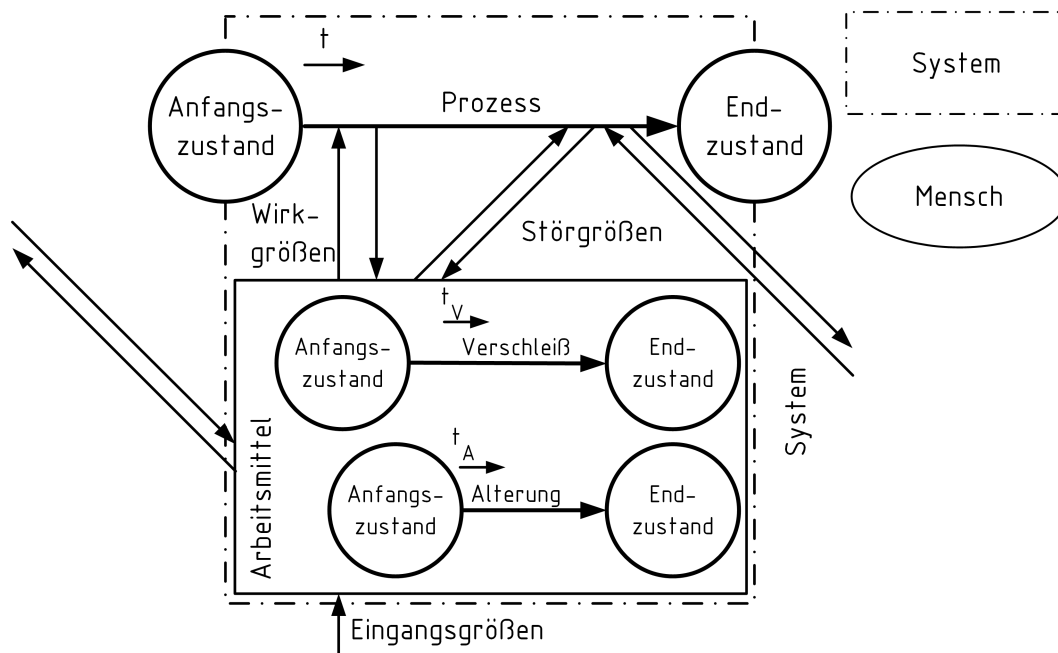


Abbildung 4.5: Modell technischer Systeme für die Abbildung von Prozessen.

## 4.2 Systematik der Robust Design-Wirkungsweisen

Um die Tauglichkeit von Konstruktionshinweisen im Robust Design zu bewerten, ist es von zentraler Bedeutung zu verstehen auf welche Weise die Robustheit grundsätzlich gesteigert werden kann. Durch den Vergleich der Wirkung eines allgemeinen Konstruktionshinweises mit den Wirkungsweisen von RD-Maßnahmen wird die Tauglichkeit des Konstruktionshinweises in Bezug auf den Einsatz im RD eingestuft, vgl. Abbildung 4.6. Unsicherheit resultiert aus allen Phasen des Produktlebens und schlägt sich in Schwankungen des technischen Produktes nieder. Hieraus ergibt sich folgendes, in Definition 4.2.1 festgehaltenes, Verständnis für die Beherrschung von Unsicherheit in Anlehnung an Definition 2.2.2:

### Definition 4.2.1.: Robustheit

Ein technisches System wird als *robust* bezeichnet, wenn die Auswirkung von Unsicherheit aus allen Lebenslaufphasen auf die Funktionserfüllung in einem festgelegten, zulässigen Rahmen bleibt. Entsprechend werden alle Tätigkeiten im Rahmen der Produktentwicklung die diesen Zustand zum Ziel haben als *Robust Design* bezeichnet.  $\square$

Das MTS, vgl. Abschnitt 4.1, dient zur Erfassung aller Lebenslaufprozesse unter Unsicherheit. Entsprechend kann es zur systematischen Ableitung von Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit eingesetzt werden. Hierbei wird unterschieden in Prozesse der *Produktion* und Prozesse der *Nutzung*, da im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Kon-

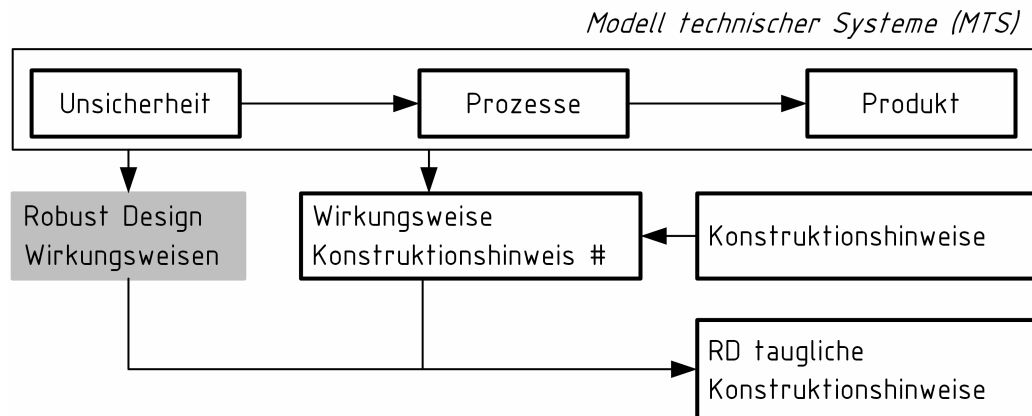


Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen dem MTS, den RD-Wirkungsweisen, der Wirkung von Konstruktionshinweisen und den für das Robust Design geeigneten Konstruktionshinweisen.

struktionshinweise aus diesen beiden zentralen Phasen des Produktlebens untersucht werden. Die identifizierten *RD-Maßnahmen* stellen eine Erweiterung der *Robust Design Strategien* nach MATHIAS dar, die systematisch aus Verhaltensmodellen abgeleitet sind, vgl. S.44. Zusätzlich berücksichtigt wird außerdem der von EBRO und HOWARD (2016) bereits für die Einstufung von Konstruktionshinweisen verwendete Ansatz der Nutzung zusätzlicher Prozesse, wie bspw. Adaption und Qualitätssicherung, zur gezielten Reduktion von Unsicherheit. Das Ziel des Abschnitts ist die Erarbeitung von allgemeinen RD-Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit entlang der Prozesskette des technischen Produktes. Diese RD-Wirkungsweisen werden in Kapitel 5 verwendet, um Konstruktionshinweise in Bezug auf die Eignung für das Robust Design einzustufen.

#### 4.2.1 Robust Design-Wirkungsweisen in der Produktion

Abbildung 4.7 zeigt exemplarisch eine Prozesskette der Produktion aus zwei Teilprozessen. Das technische Produkt wird in diesen beiden Teilprozessen von einem Anfangszustand (AZ) in einen Endzustand (EZ) überführt. Maßnahmen, die direkt die Schwankungen in den Produkteigenschaften reduzieren sind das *Einschränken der Schwankung* und das *Anpassen der Schwankung*. Beide Maßnahmen nutzen einen zusätzliche Prozess zur Verringerung von Schwankungen in Produkteigenschaften. Das *Einschränken der Schwankungsbreite* trennt Bauteile mit unzulässiger Schwankung von Bauteilen mit Schwankung innerhalb eines zulässigen Schwankungsbereiches. In der Folge werden nur Bauteile im Rahmen der zulässigen Schwankungsbreite verarbeitet, Unsicherheit im Bauteil hat keinen weiteren Einfluss über den zulässigen Rahmen hinaus. Als Beispiel für diese RD-Wirkungsweise kann die klassische Qualitätssicherung angeführt werden.

---

<sup>5</sup>Quelle: Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFFER (2017), S. 92.

Beherrschung von Unsicherheit in der Produktion

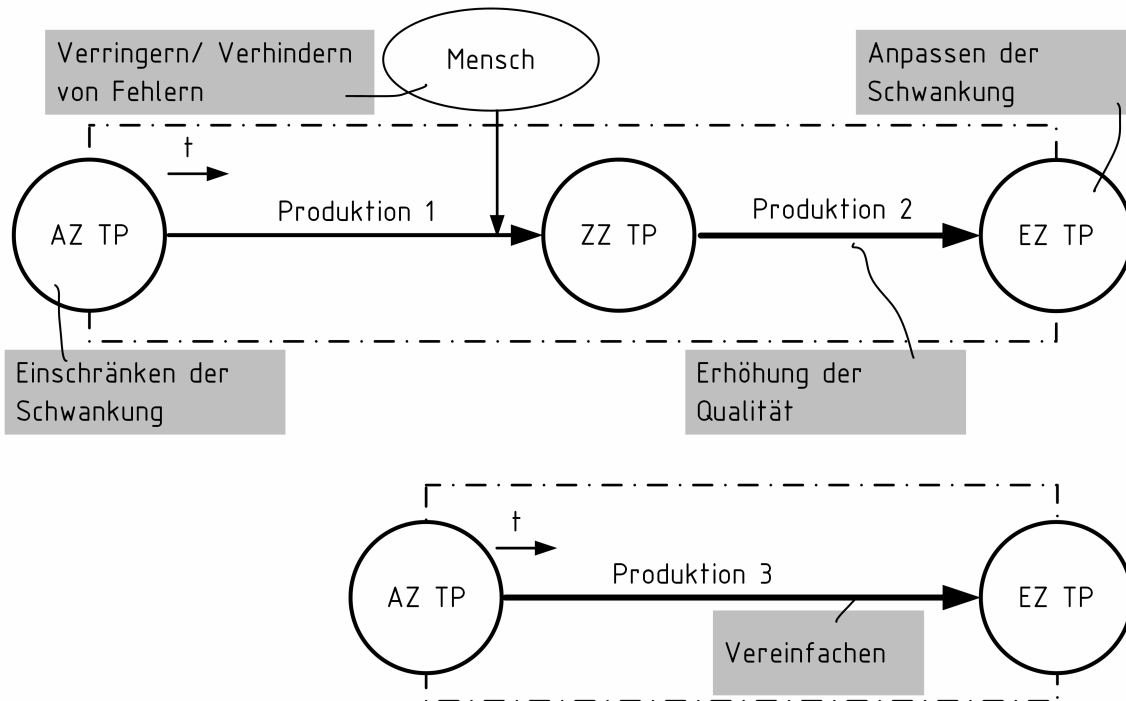


Abbildung 4.7: RD-Wirkungsweisen in Produktionsprozessen.

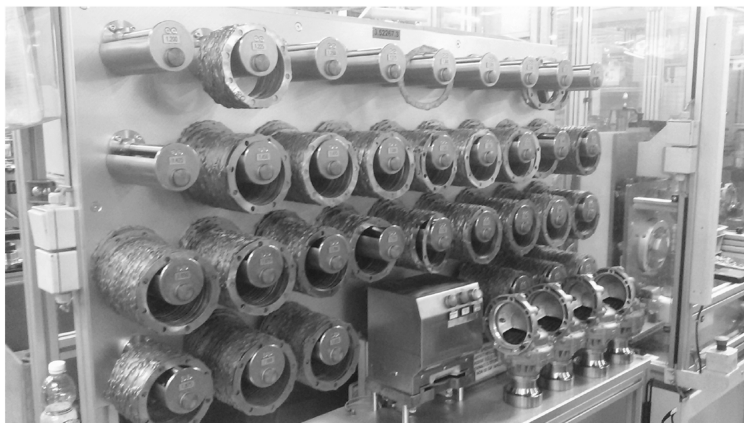


Abbildung 4.8: Einstellscheiben für eine Kegelradstufe des Hinterachsabtriebs der allradgetriebenen A-Klasse-Fahrzeuge von Mercedes-Benz.<sup>5</sup>

Das *Anpassen der Schwankung* verändert eine Eigenschaft des technischen Produktes derart, dass die resultierende Schwankung innerhalb der zulässigen Schwankungsbreite liegt. Abbildung 4.8 verdeutlicht dies am Beispiel eines Sortiments an Einstellscheiben für die Montage einer Kegelradstufe. Nach Vermessung der Ist-Toleranzen in Wellenlängsrichtung von Welle und Gehäusezusammenbau werden die Einstellscheiben rechnergestützt ausgewählt, von einem Roboter aufgenommen und in die Toleranzkette im Produkt eingefügt. Somit wird die Ist-Passung des Produktes im zusammengebauten Zustand in einem engen Fenster gehalten, am Beispiel der Kegelradstufe wird damit eine genaue Positionierung der Kegelräder in axialer Richtung erreicht.<sup>6</sup>

Das *Vereinfachen* einer bestehenden Prozesskette kann ebenfalls die resultierende Gesamtschwankung in den Produkteigenschaften verringern. Einfachheit wird dabei begrifflich als Antagonist von Komplexität verstanden und kann immer nur relativ zu einem anderen Prozess beurteilt werden. Nach FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 502 sind einfache Produktionsprozesse gekennzeichnet durch gängige geometrische Formen, wenige Fertigungsverfahren mit geringen Umspann-, Rüst- und Wartezeiten und übersichtliche Formen, die die Kontrolle erleichtern und beschleunigen. Damit tragen einfache Produktionsprozesse zur Vermeidung von Schwankungen bei, die zwangsläufig durch die meisten zusätzlichen Prozessschritte entstehen.

Das *Verhindern bzw. Verringern von Fehlern*, vgl. Abbildung 4.7 zielt auf den Einfluss des Menschen auf Schwankungen in Produktionsprozessen ab. Durch eine geschickte Bauteilgestaltung gilt es Fehler zu vermeiden bzw. ihre Auftretenswahrscheinlichkeit zu verringern. Besonders zur Unterstützung der Montage gibt es eine große Zahl an Konstruktionshinweisen. Das Beispiel in Abbildung 4.9 zeigt einen Auszug aus Richtlinien

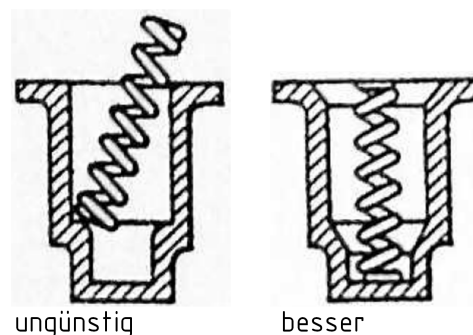


Abbildung 4.9: Auszug aus Richtlinien zum *montagegerechten Gestalten* mit dem Ziel eindeutiger Endzustände in der relativen Lage der Fügeteile.<sup>7</sup>

zum montagegerechten Gestalten aus KOLLER (1998), S. 248. Die anzustrebende Gestalt sollte demnach so gewählt sein, dass nur ein eindeutig beschreibbarer Endzustand in der Positionierung der Schraubenfeder relativ zum Topf möglich ist. Hierzu dient die Fase

---

<sup>6</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFER (2017), S. 92.

<sup>7</sup>Quelle: Vgl. KOLLER (1998), S. 248.

an der Innenseite des Topfes. Sie kompensiert Abweichungen in der Konzentrität der beiden Fügepartner während der Montage, indem die Feder durch die Schräge in eine stabile Gleichgewichtslage geführt wird, die sich konzentrisch zum Topf befindet. Die Anordnung der beiden Teile zueinander ist also unabhängig von Positionierungsabweichungen durch den Menschen.

Die RD-Wirkungsweise *Erhöhung der Qualität* ist nicht wie die anderen RD-Wirkungsweisen direkt aus Abbildung 4.7 abgeleitet, sondern das Resultat einer iterativen Anpassung der RD-Wirkungsweisen, vgl. Abschnitt 5.2. Der Grund liegt im historisch gewachsenen Begriffsverständnis in der Literatur. In der konstruktionswissenschaftlichen Literatur sind sehr viele der Gestaltungsrichtlinien für fertigungsgerechtes Gestalten mit einem *Q* gekennzeichnet, um deutlich zu machen, dass die Berücksichtigung des entsprechenden Hinweises zu geringen Schwankungen in den während der Fertigung festgelegten Produkteigenschaften führt. Aus heutiger Perspektive tragen die Hinweise zur Reduktion von Unsicherheit bei, daher wird die Kategorie *Erhöhung der Qualität* als RD-Wirkungsweise aufgenommen. Konstruktionshinweise mit dieser Kennzeichnung können so zur Beherrschung von Unsicherheit berücksichtigt werden. Abbildung 4.10 zeigt ein Beispiel aus

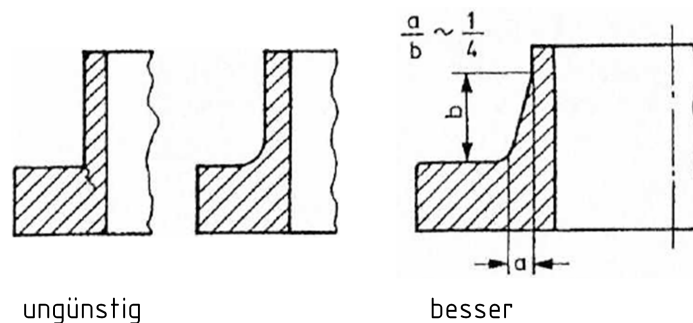


Abbildung 4.10: Beispiel für Richtlinien zur *gussgerechten Gestaltung*. Die Schwankungen in den Geometrieigenschaften der Gussteile werden verringert, indem durch geeignete Maßnahmen Schrumpfspannungen reduziert werden.<sup>8</sup>

KOLLER (1998), S. 217 zum Thema *gussgerechte Gestaltung*, das mit *Q* gekennzeichnet ist. Bei Ausführung von Gussteilen mit sehr unterschiedlichen Wanddicken und schroffen Übergängen zwischen den Bereichen kommt es durch Schrumpfen bei der Abkühlung des Gussteils zu Dehnungsbehinderung und damit zur Ausprägung von Eigenspannungen im Gussteil. Diese Eigenspannungen können zur unzulässigen Verformung des Gussteils und sogar bis zum Versagen führen. Durch Anwendung der Gestaltungsrichtlinien wird der Einfluss der Prozessgröße Temperatur auf die Objekteigenschaften des Gussteils verringert. Durch gleichmäßige Wanddicken entstehen weniger Dehnungsbehinderungen und entsprechend weniger thermisch induzierte Eigenspannungen. Dies wirkt sich in der

<sup>8</sup>Quelle: Vgl. KOLLER (1998), S. 217.

Folge auf den thermisch induzierten Verzug der Geometrie aus und führt zu geringeren Schwankungen in den Eigenschaften des Gussstücks.

### 4.2.2 Robust Design-Wirkungsweisen in der Nutzung

Abbildung 4.11 zeigt die im *MTS* verorteten *RD-Wirkungsweisen* für die Nutzungsphase technischer Produkte.

#### Beherrschung von Unsicherheit in der Nutzung

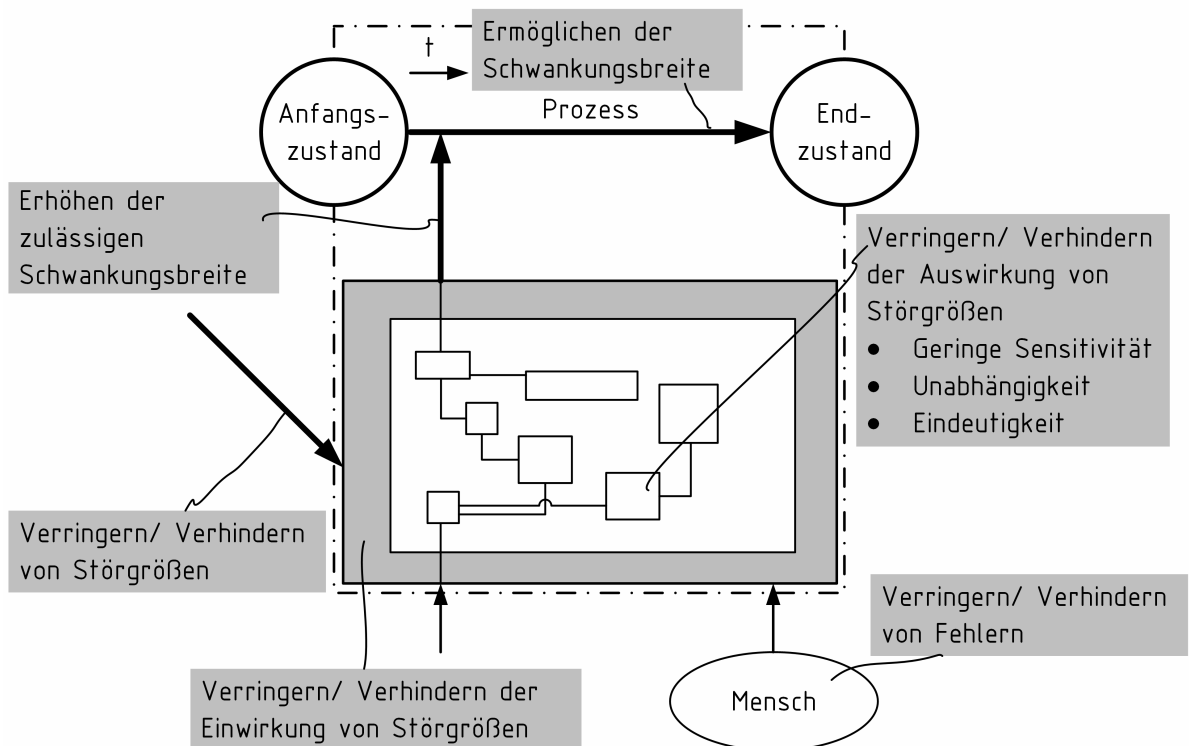


Abbildung 4.11: RD-Wirkungsweisen im Nutzungsprozess.

Die RD-Wirkungsweise *Schwankungsbreite ermöglichen* adressiert allgemein den Umgang mit Prozessvarianten. Prozessvarianten lassen sich in Anlehnung an Produktvarianten, vgl. BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2007), S. 246, gemäß Definition 4.2.2, verstehen.

#### Definition 4.2.2.: Prozessvariante

Eine Prozessvariante unterscheidet sich von einem anderen Prozess durch die unterschiedliche Ausprägung mindestens einer Prozesseigenschaft im Modell technischer Systeme. □

Prozessvarianten treten auf, wenn ein technisches Produkt für verschiedene Einsatzzwecke entwickelt wird. Je nachdem wie das technische Produkt gestaltet ist kann bspw. durch Konfiguration eine Anpassung an den geplanten Nutzungsprozess erfolgen. Anders verhält es sich mit Nutzungsprozessen, die sich im Laufe der Nutzungsdauer ändern. Ein Beispiel hierfür stellt die Nutzung von *Smartphones* dar. Der Funktionsumfang nimmt hier extrem schnell zu, jedoch steigen damit auch die Anforderungen an die Geräte in Bezug auf Prozessorleistung usw.. In der Folge kann ein 2 Jahre altes Telefon schon nicht mehr alle aktuell möglichen Nutzungsprozesse ausführen, die Geräte sind also nicht *zukunftsrobust*, da eine Schwankung im Nutzungsprozess vom technischen Produkt nicht kompensiert werden kann.



Abbildung 4.12: Modular aufgebautes *Fairphone 2*.

Ein Beispiel zur gelungenen Umsetzung der RD-Wirkungsweise *Schwankungsbreite ermöglichen* zeigt Abbildung 4.12. Das sogenannte *Fairphone* ist modular aufgebaut, damit kann es sowohl sehr leicht repariert und an die Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden, bspw. indem mehr Speicher eingebaut wird.<sup>9</sup> Zusätzlich können die einzelnen Module bei Bedarf, und unter Berücksichtigung der festgelegten Schnittstellen und Bau- raumzwänge, substituiert werden. So kann bspw. die Leistungsfähigkeit des Telefons in Zukunft angepasst werden, indem eine dem Stand der Technik entsprechende Prozessor- einheit eingebaut wird. Die Schwankung im Nutzungsprozess wird also auf der Seite des technischen Produktes durch Adaption kompensiert.

Der *Mensch* spielt in Bezug auf Unsicherheit eine wichtige Rolle, da er direkt mit dem technischen System interagiert, vgl. Abbildung 4.11. Entsprechend besteht eine Wirkungsweise von RD-Maßnahmen darin das technische Produkt derart zu gestalten, dass seine Funktionsweise möglichst unabhängig von schwankenden Kompetenzen oder unterschiedlicher Motivation des Menschen ist.

Abbildung 4.13 zeigt zwei Varianten einer Steckverbindung aus dem Elektronikbereich zur Illustration der RD-Wirkungsweise *Verringern/Verhindern von Fehlern*. Auf der linken Seite ist ein *USB-Stecker* dargestellt. Von außen betrachtet ist er auf den ersten

<sup>9</sup>Vgl. <https://www.fairphone.com/de/>

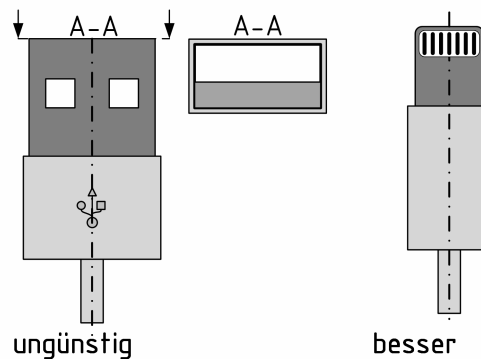


Abbildung 4.13: Zwei Varianten von Steckverbindungen im Elektronikbereich. Links, *USB-Stecker*. Rechts, *Lightning-Stecker*.

Blick symmetrisch aufgebaut, was dem Nutzer suggeriert, dass die Einsteckposition keine Rolle spielt. In Wirklichkeit ist der Stecker jedoch innen asymmetrisch ausgeführt, wodurch nur eine Einsteckposition möglich ist. Die Folge ist häufiger Misserfolg beim Einstecken. Ein Positivbeispiel ist der *Lightning Anschluss* von *Apple*, vgl. Abbildung 4.13 rechts. Auch dieser Stecker ist symmetrisch aufgebaut, jedoch führen beide möglich erscheinenden Einsteckpositionen zu einem funktionstüchtigen Ergebnis. Für NORMAN (2013), S. 127 stellt sich in diesem Kontext folgende Frage: „Why aren’t all these devices [Schließsysteme, elektronische Steckverbindungen] orientation insensitive?“

Eine weitere RD-Wirkungsweise, die sich streng systematisch aus Definition 4.2.1 ergibt, ist die *Erhöhung der zulässigen Schwankungsbreite*, vgl. Abbildung 4.11. Hierbei wird nicht die auftretende Schwankungsbreite reduziert, sondern die zulässige erhöht, was insgesamt zu einem robusten Verhalten führen kann. Diese Maßnahme beinhaltet jedoch eine Anpassung der an das System gestellten Anforderungen, was bei einer sauberen Anforderungsermittlung streng genommen nicht möglich ist. Allerdings lohnt es sich das Bewusstsein dafür zu schärfen, dass unnötig eng gesteckte Anforderungen einen großen Einfluss auf den Aufwand zur Entwicklung einer passenden Lösung haben. Beispielsweise werden in der Automobilindustrie für Start-Stopp-Systeme 1,2 Millionen Starts auf 300.000 km Laufleistung gefordert, was einem Motorstart alle 250 m über der ganzen Fahrzeuglebensdauer entspricht. Diese sehr konservative Anforderung führte bereits zum Scheitern einiger Neukonzepte.<sup>10</sup>

Die RD-Wirkungsweise *Verringern/Verhindern der Störgröße*, vgl. Abbildung 4.11, ist im strengen Sinn keine Maßnahme, die auf die Anpassung oder Gestaltung des technischen Produktes zur Erhöhung der Robustheit abzielt, sondern eine Maßnahme, die den Nutzungskontext beschränkt. Typischerweise werden diese Einschränkungen bei Erwerb eines technischen Produktes in der Bedienungsanleitung kommuniziert.

Zur normierten Erfassung der Empfindlichkeit gegenüber Störgrößenexposition bietet

---

<sup>10</sup>Quelle: E. KIRCHNER, Gesprächsnotiz



### IP Code nach DIN EN 60529

Ziffer 1: Schutz gegen das Eindringen von Fremdkörpern

Ziffer 2: Schutz gegen das Eindringen von Wasser



Kopflampe *Storm*, geschützt nach IP 67

6= staubdicht

7= zeitweiliges Untertauchen

Abbildung 4.14: Schutzarten am Beispiel einer Kopflampe.

die *DIN EN 60529* die Klassifizierung in sogenannte Schutzarten. Die maximal mögliche Exposition in Bezug auf das *Eindringen von Fremdkörpern* und *Eindringen von Wasser* wird als zweistelliger Zahlencode notiert, vgl. Abbildung 4.14. Aus dem Code kann der Nutzer die Einschränkungen für das vorliegende Produkt ableiten. Die Kopflampe in Abbildung 4.14 verfügt demnach über einen vollständigen Schutz gegen Staub und erträgt zeitweiliges Untertauchen schädigungsfrei. Aus dieser Information folgt nach der Wirkungsweise *Verhindern der Störgröße* die Unterlassung von Einsatzprozessen, die ein längeres Untertauchen der Lampe beinhalten.

Die RD-Wirkungsweise *Verhindern/Verringern der Einwirkung von Störgrößen*, vgl. Abbildung 4.11, findet in technischen Systemen vielfach Anwendung. Meist durch zusätzliche Systemelemente wird verhindert, dass eine Störgröße ein System beeinflussen kann. Der im Stand der Forschung beschriebene *Modulationshebel* zur Reduktion des spürbaren Schaltkratzens, vgl. S.45, ist ein bereits im Rahmen dieser Arbeit geschildertes Beispiel für die Anwendung dieser RD-Wirkungsweise.

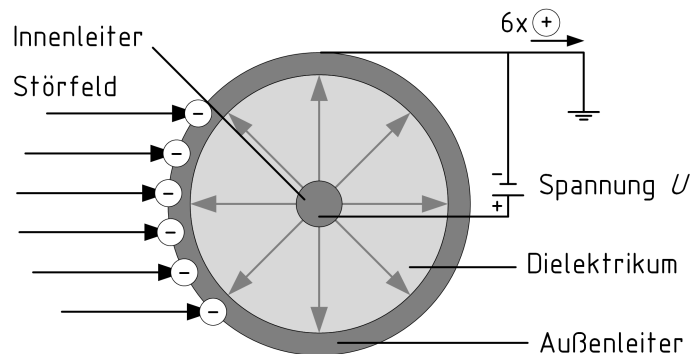


Abbildung 4.15: Koaxialkabel als Beispiel für die Abschirmung von Störfeldern.

Ein weiteres Beispiel stellt die Abschirmung von elektrischen Störfeldern in Koaxialkabeln dar, vgl. Abbildung 4.15. Koaxialkabel nutzen hierbei den physikalischen Effekt der

*Influenz*<sup>11</sup>. Der Außenleiter des Koaxialkabels ist mit der Erde verbunden. Ist er einem elektrischen Störfeld ausgesetzt, verschieben sich positive Ladungen im Außenleiter und fließen in die Erde ab, sodass die Feldlinien des Störfeldes auf den verbleibenden, negativen Ladungen auf der Außenseite des Kabels enden. Das Feld im Inneren wird hiervon nicht beeinflusst. Derselbe Effekt ist für die Schutzwirkung vor Blitzeinschlag in einem FARADAY<sup>12</sup>-schen Käfig verantwortlich.

Donnerstag, 13. März 2014

**Problem-Heli der Bundeswehr: Der NH90 rostet**

Der (...) von der Bundeswehr für die Marine bestellte Hubschrauber NH90 "Sea Lion" bereitet der Bundeswehr immer mehr Kopfschmerzen. (Jetzt) wird ihm (...) auch noch eine hohe Korrosionsanfälligkeit bescheinigt.

So seien beim Einsatz vor der Küste Somalias auffällig häufig Rostschäden festgestellt worden.

Abbildung 4.16: Meldung über fehlenden Korrosionsschutz am *NH-90*.<sup>13</sup>

Welche Konsequenzen durch eine ungenügende Umsetzung der RD-Wirkungsweise *Verhindern/Verringern der Einwirkung von Störgrößen* entstehen können, zeigt das Beispiel des neuen Marinehelikopter *NH-90* der *Bundeswehr*. Nachrichtenmeldungen zufolge, vgl. Abbildung 4.16, ist der Helikopter unzureichend gegen Salzwasser geschützt, was dazu führt, dass der *NH-90* in der Marineausführung wegen der hohen Korrosion nur eingeschränkt zu maritimen Zwecken eingesetzt werden kann. Der Imageverlust für das Herstellerkonsortium *NHI* (*NATO Helicopter Industries*) ist entsprechend hoch.

Die RD-Wirkungsweise *Verhindern/Verringern der Auswirkung von Unsicherheit*, vgl. Abbildung 4.11, beschreibt Maßnahmen, die die Komponenten des Arbeitsmittels und ihre Verknüpfungen derart beeinflussen, dass das Verhalten des Arbeitsmittels robust gegenüber Schwankungen ist. Diese Maßnahmen sind von hoher Bedeutung für das RD, da Robustheit dort direkt im technischen System und ohne zusätzliche Systemelemente implementiert wird. Entsprechend wird Maßnahmen, die in diesem Bereich wirken, im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Beachtung geschenkt, was zu einer differenzierteren Betrachtung der Wirkungsweise führt. Insgesamt werden drei verschiedene Subkategorien der Wirkungsweise *Verhindern/Verringern der Auswirkung von Unsicherheit* eingeführt:

---

<sup>11</sup>*Influenz* (lat. Einfluss) bezeichnet die räumliche Verschiebung elektrischer Ladungen durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes.

<sup>12</sup>*Michael Faraday* (\* 22. September 1791 in Newington, Surrey; † 25. August 1867 in Hampton Court Green, Middlesex) war ein englischer Naturforscher und ein bedeutender Experimentalphysiker.

<sup>13</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach N-TV (13.03.2014), <http://www.n-tv.de/politik/Der-NH90-roestet-article12451481.html>.



Übertragung tangentialer Reibkräfte und damit die Übertragung eines Drehmoments vom Zahnrad auf die Welle. Sobald die Haftbedingung nach dem COULOMB-*schen Reibgesetz* nicht mehr erfüllt ist, rutscht die Kupplung durch.<sup>16</sup> Die Vorspannkraft  $F$  der Feder legt also das übertragbare Drehmoment fest. Die Vorspannkraft  $F$  hängt vom Vorspannweg und ihrer Federsteifigkeit ab, wobei beide Größen noch abhängige Eigenschaften sind. Der Federweg  $s$  wird bspw. durch die Bauteiltoleranzen in axialer Richtung von Reibscheibe, Welle, Zahnrad, Feder und Mutter beeinflusst. Zusätzliche Schwankungen im Federweg  $s$  können durch Schwankungen beim Anziehen der Mutter entstehen. Aus der Soll-Federkraft  $F_{\text{Soll}}$  kann nun für beide Lösungen die jeweiligen Soll-Federwege  $s_a$  und  $s_b$  bestimmt werden, wobei die Steifigkeit der Federn als ideal angenommen wird. Für die beiden Federelemente ergeben sich unterschiedliche Kennlinien. Die Schraubenfeder verfügt über ein lineares Kraft-Weg-Verhalten, während die Tellerfeder-Kennlinie im dargestellten Bereich im Vergleich zunächst progressiv ansteigt, dann aber degressiv abflacht.<sup>17</sup> Werden nun im Federkraft-Federweg-Schaubild beide Kennlinien eingetragen und zusätzlich die möglichen Schwankungen des Federwegs um die geplanten Betriebspunkte  $s_a$  und  $s_b$  in resultierende Schwankungen der Federkraft  $F$  umgerechnet, zeigt sich, dass beide Lösungen zwar die Funktion erfüllen können, jedoch in Bezug auf Schwankungen ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen. Die im Vergleich zur Schraubenfeder um den Arbeitspunkt der Tellerfeder degressive Kennlinie bewirkt, dass Schwankungen im Vorspannweg  $s_b$  sich weniger stark auf die Federkraft  $F$  auswirken als Schwankungen in  $s_a$ . Unter Robust Design Gesichtspunkten ist also die Lösung mit Tellerfedern im untersuchten Fall die bessere Lösung.

Die RD-Wirkungsweise *Unabhängigkeit* ist eine Sonderform des *Verringerens der Auswirkung von Unsicherheit*, bei der eine Schwankung in einer Eigenschaft keine Schwankung des angestrebten Verhaltens bewirkt, oder aber eine schwankende Eigenschaft in gar keinem Zusammenhang mit dem Verhalten steht. Abbildung 4.18 zeigt ein Beispiel aus dem Klettersportbereich, das durch geschickte Nutzung des *Prinzips der Selbstverstärkung* unabhängig von großen Schwankungen in Betriebslasten ist. Es handelt sich um ein sogenanntes *mobiles Sicherungsgerät*, das während des Kletterns verwendet wird, um Fixpunkte zur Selbstsicherung am Fels zu schaffen, vgl. Abbildung 4.18 links. Im Kletterjargon werden die hier behandelten Klemmgeräte als *Friends* bezeichnet. Bei *Friends* handelt es sich technisch gesehen um symmetrisch aufgebaute Kniehebel, die im Wesentlichen aus einem *Schaft* und zwei *Klemmbacken* auf jeder Seite bestehen. Die Geometrie der Klemmbacken legt den sogenannten *Klemmwinkel*  $\alpha$  fest, der den Winkel zwischen der Horizontalen und der Geraden bezeichnet, die durch den Kontaktpunkt der Klemmbacke am Fels und den Drehpunkt der Klemmbacke am Schaft verläuft, vgl. Abbildung 4.18 Mitte. Durch die Schneckenform der Klemmbacken ist der Klemmwinkel  $\alpha$  für unterschiedliche Rissbreiten konstant. *Friends* funktionieren reibkraftschlüssig;

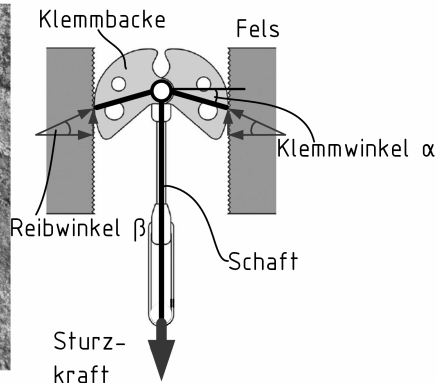
<sup>16</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFER (2017), S. 229.

<sup>17</sup>Vgl. KIRCHNER und BIRKHOFER (2017), S. 280, zum üblicherweise genutzten Wegbereich von Tellerfedern. Die Abbildung im Text zeigt nur einen Ausschnitt der allgemeinen Feder-Kennlinie von Tellerfedern im Bereich  $s/h_0 < 0,75$ .

DMM Dragoncam  
Im Einsatz



Klemmgerät  
Prinzipdarstellung



Klemmgerät  
Auslegung zur Funktionserfüllung

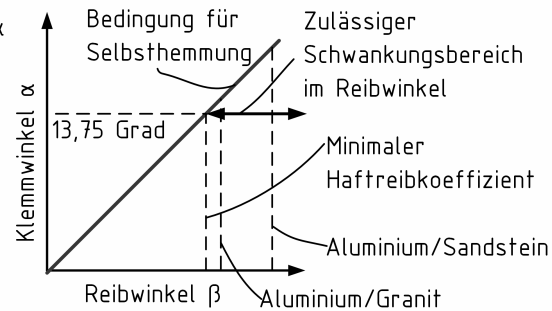


Abbildung 4.18: Funktionsweise von *Friends* zur Illustration der RD-Wirkungsweise *Unabhängigkeit*.

Sturzkkräfte in vertikaler Richtung werden durch den Kniehebel umgeformt und erzeugen Anpresskräfte normal zur Felswand, die den Reibkraftschluss herstellen. Die Funktionserfüllung ist jedoch nur dann sichergestellt, wenn die Anpresskräfte so groß sind, dass *Selbsthemmung* vorliegt. Hierbei sind zwei Größen für die Funktionsweise entscheidend. Der *Klemmwinkel*  $\alpha$  bestimmt die Übersetzung des Kniehebels und legt damit fest, wie groß die Anpresskraft in Folge der Sturzkraft ist. Auf der anderen Seite legt der zwischen Fels und Klemmbacken vorliegende Haftreibungkoeffizient  $\mu_0$  den für Selbsthemmung benötigten *Reibwinkel*  $\beta$  fest, es gilt  $\beta = \arctan(\mu_0)$ . Das System befindet sich entsprechend dann im Gleichgewicht, wenn der Reibwinkel  $\beta$  und der Klemmwinkel  $\alpha$  gleich sind, oder der Klemmwinkel  $\alpha$  kleiner als der Reibwinkel  $\beta$  ist, vgl. Abbildung 4.18 rechts. Zur Auslegung der *Friends* muss also der Haftreibungkoeffizient  $\mu_0$  zwischen Fels und Klemmbacke bekannt sein, allerdings ist dieser extrem unsicherheitsbehaftet und schwankt je nach Gesteinsart, der jeweils vorliegenden Oberflächenstruktur und den jeweiligen Umgebungsbedingungen in Bezug auf Moosbewuchs, Feuchte, Eis usw.. Für Aluminium/Sandstein findet sich in einer Internetquelle  $\mu_0 = 0,7$ , während die Paarung Aluminium/Granit mit  $\mu_0 = 0,33$  angegeben wird.<sup>18</sup> Hieraus ergibt sich für den schlechtesten Fall Aluminium/Granit ein maximaler Klemmwinkel von  $\alpha = 18,26$  Grad. Der *Friend* ist ein sicherheitskritisches Element, an dem im wahrsten Sinne des Wortes Menschenleben hängen, daher werden *Friends* heute üblicherweise mit einem Klemmwinkel von  $\alpha = 13,75$  Grad hergestellt, das entspricht einem Mindest-Haftreibungkoeffizienten von  $\mu_0 = 0,24$ . Damit ergibt sich eine Sicherheit von 1,38 in Bezug auf den Haftreibungkoeffizienten Aluminium/Granit. Im Rahmen der sich aus dem Klemmwinkel  $\alpha = 13,75$  Grad

<sup>18</sup>Vgl. BRUTSCHER (2013), S.2.

ergebenden Einsatzgrenze ist die Funktionserfüllung des *Friends* bis hin zum Versagen ab etwa 22 kN vollkommen unabhängig von der aufgetragenen Sturzlast und somit robust gegenüber Schwankungen durch unterschiedlich hohe Stürze, oder unterschiedlich schwere Kletterer.

*Eindeutigkeit*, vgl. Abbildung 4.11, beschreibt nach FELDHOUSE ET AL. (2013), S. 495 die Möglichkeit einen klaren Zusammenhang zwischen Größen in Bezug auf Produktmodelle (Funktionen, Wirkstrukturen..), aber auch auf prozessbedingte Zustände (Fertigung, Montage, Betrieb) herstellen zu können. *Eindeutigkeit*, im englischen Sprachgebrauch *clarity*, hat in Bezug auf die Verwendung im Robust Design eine Sonderrolle, da sie gleich auf *zwei* verschiedene Arten wirkt. Zum *einen* ist Eindeutigkeit die Grundvoraussetzung für die Bewertung von Robustheit.<sup>19</sup> Robustheit ist erst messbar, wenn ein Zusammenhang zwischen schwankenden Objekteigenschaften und der Funktion angegeben werden kann. So kann bspw. die Robustheit der beiden Rutschkupplungen in Abbildung 4.17 in Bezug auf die Schwankung des Federweges nur deswegen beurteilt werden, weil der Zusammenhang zwischen Federweg und Vorspannkraft eindeutig mathematisch beschreibbar ist.

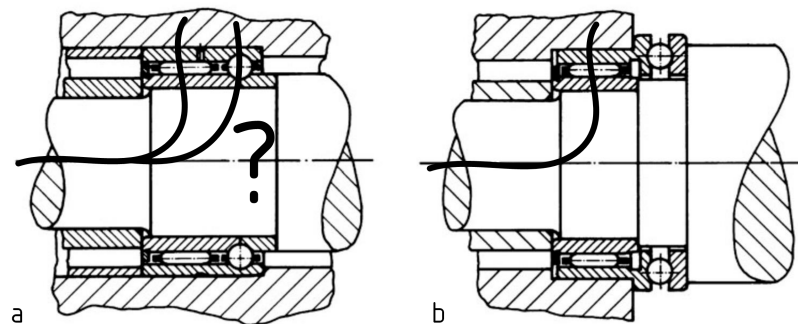


Abbildung 4.19: Zwei Varianten einer Lagerung. Lagerung a ist uneindeutig in Bezug auf die Radialkraft, Lagerung b weist einen eindeutigen Kraftfluss in radialer Richtung auf.<sup>20</sup>

Den *zweiten* Effekt der Wirkungsweise eindeutig illustriert Abbildung 4.19. Sie zeigt die Gegenüberstellung zweier Lösungsvarianten einer Radial- bzw. Axiallagerung. In *Variante a* wird die Radialkraft sowohl vom *Nadelager* als auch vom *Radialrillenkugellager* aufgenommen. Ohne exakte Kenntnis der Geometrien und Moduln der Einzelteile kann der Anteil der jeweils von Nadel- bzw. Radialrillenkugellager aufgenommenen Radialkraft nicht bestimmt werden. Eine Aussage über die Lagerlebensdauer bzw. eine Auslegung der Lager ist nur stark unsicherheitsbehaftet bzw. unter Einbeziehung erheblicher Sicherheitsbeiwerte möglich. Im Gegensatz hierzu zeigt *Variante b* eine eindeutige Kombination von Nadel- und Kugellager. Die jeweiligen Lagerlasten können allein aus

<sup>19</sup>Vgl. EBRO ET AL. (2012).

<sup>20</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach FELDHOUSE ET AL. (2013), S. 497.

der Statik bestimmt werden. Entsprechend determiniert kann die Lagerlebensdauer angegeben werden. Die eindeutige Lagerung ist also von deutlich weniger schwankenden Eigenschaften abhängig, was der Robustheit zugute kommt. Ein zusätzlicher Nutzen eindeutiger Produkte ist die im Regelfall deutlich weniger komplexe<sup>21</sup> Berechnung. Dies schlägt sich entsprechend in weniger Elementen, weniger Relationen zwischen den Elementen und weniger möglicher Zustände von Elementen und Relationen nieder, vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 501. Obgleich einige Ansätze in der Literatur zu finden sind<sup>22</sup>, existiert bislang keine allgemeine Methode zur Analyse und Synthese eindeutiger Produkte. Mit der sogenannten *Wirkkettenanalyse und -synthese* stellen FREUND ET AL. (2015)(1), S. 53f., FREUND ET AL. (2015)(2), S. 109 f. und FREUND ET AL. (2016), S. 193f. jedoch einen Ansatz zur Erhöhung von Eindeutigkeit vor.

### 4.2.3 Kriterien zur Einstufung von Konstruktionshinweisen

Die Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2 zeigen eine Vielzahl von Wirkungsweisen zur Erhöhung der Robustheit entlang der Lebenslaufprozesse Produktion und Nutzung auf. Hierbei können acht bereits bekannte Wirkungsweisen verschiedener Autoren<sup>23</sup> konsistent im *MTS* verortet und damit konsolidiert in einem Modell abgebildet werden, vgl. Tabelle 4.1. Zusätzlich werden drei weitere RD-Wirkungsweisen berücksichtigt, wobei zwei davon aus dem *MTS* und den Unsicherheitskategorien des *SFB 805* abgeleitet sind und eine weitere sich aus der Dokumentation der *Konstruktionshinweise zum fertigungsgerechten Gestalten* in der Literatur ergibt, vgl. S. 67.

Zur Beurteilung allgemeiner Konstruktionshinweise in Bezug auf die Anwendbarkeit im Robust Design stehen also insgesamt *elf* RD-Wirkungsweisen zur Verfügung. Während die in Tabelle 4.1 dargestellten RD-Wirkungsweisen zur Einstufung allgemeiner Konstruktionshinweise zunächst nicht bewertet werden müssen, ist eine relative Bewertung der RD-Wirkungsweisen zueinander für die Anwendung von Konstruktionshinweisen im Konstruktionsalltag zweckmäßig, da dort verschiedene Lösungen gegeneinander abgewogen werden müssen, die jeweils auf der Anwendung RD-tauglicher Konstruktionshinweise beruhen. EBRO und HOWARD (2016), S. 19 stellen fest, dass eine allgemeingültige Empfehlung in Bezug auf die Bevorzugung von RD-Wirkungsweisen schwer auszusprechen ist, jedoch *prozessbezogene Maßnahmen* weniger favorisiert werden sollten als *produktbezogene Maßnahmen*. Dies ist insofern sinnvoll, als dass jeder zusätzliche Prozess immer selbst unsicherheitsbehaftet und durch den prozeduralen Charakter immer mit Einsatz von Ressourcen verbunden ist. In Anlehnung an diese grundsätzliche Empfehlung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die in Abbildung 4.20 dargestellte Leitlinie zur Priorisierung von RD-Maßnahmen verwendet. *Unabhängigkeit U* ist eine extreme Ausprägung der *reduzierten Auswirkung von Unsicherheit* und die stärkste

---

<sup>21</sup>Vgl. bspw. SCHOENEBERG (2014), S. 3.

<sup>22</sup>Vgl. bspw. LEMBURG (2009), S. 81f.; vgl. EBRO ET AL. (2012); vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 495; vgl. EIFLER (2014), S. 99f.

<sup>23</sup>Vgl. SUH (2001); vgl. EBRO ET AL. (2012); vgl. MATHIAS (2015); vgl. EBRO und HOWARD (2016).

Tabelle 4.1: Übersicht der Wirkungsweisen von Robust Design Maßnahmen.

| Maßnahme  | Kurzzeichen | Quelle         |
|---|-------------|----------------|
| Auswirkung von Störgrößen reduzieren                                  | <b>A</b>    | MATHIAS (2015) |
| Unabhängigkeit der Funktionen durch Entkoppeln erreichen              | <b>U</b>    | SUH (2001)     |
| Vorhersagbarkeit/ Beschreibbarkeit steigern durch Eindeutigkeit       | <b>V</b>    | EBRO (2012)    |
| Kontrollieren   | <b>K</b>    | HOWARD (2016)  |
| Zulässigen Bereich für Schwankung vergrößern                          | <b>B</b>    | HOWARD (2016)  |
| Genauere Eigenschaften durch Erhöhen der Fertigungsqualität erreichen | <b>Q</b>    | DfM            |
| Einfluss von Störgrößen reduzieren/eliminieren                        | <b>E</b>    | MATHIAS (2015) |
| Steigerung der Anpassbarkeit  | <b>Z</b>    | HOWARD (2016)  |
| Fehlermöglichkeiten durch Menschen reduzieren                         | <b>F</b>    | SFB 805        |
| Teile und Prozesse vereinfachen                                       | <b>Ei</b>   | SFB 805        |
| Störgröße reduzieren/eliminieren                                      | <b>S</b>    | MATHIAS (2015) |

Form der Robustheit, da Schwankungen in Objekteigenschaften hier keine Auswirkung mehr auf die Funktionserfüllung haben. Im Anschluss folgt die *reduzierte Auswirkung von Unsicherheit*. Bei beiden Wirkungsweisen funktioniert das technische System unter Unsicherheit *ohne* zusätzliche Elemente oder Prozesse. Sind solche Lösungen nicht möglich, bieten sich Lösungen an, die durch Ergreifen *zusätzlicher Maßnahmen* eine *Einflussnahme der Unsicherheit* auf das technische System *verringern* bzw. verhindern. Erst danach sollten Maßnahmen ergriffen werden, die durch zusätzliche Prozesse die Unsicherheit verringern, oder gar dafür sorgen dass Unsicherheit selbst nicht entsteht, vgl. Abbildung 4.20.

Eine Sonderrolle nimmt *Eindeutigkeit* ein. Sie sollte grundsätzlich immer angestrebt werden und ist die Voraussetzung für die Beurteilung der Robustheit<sup>24</sup>. Kann keine Eindeutigkeit erzeugt werden, müssen weitere Maßnahmen zur Abmilderung der Uneindeutigkeit ergriffen werden, vgl. Abbildung 4.20. An erster Stelle steht hierbei das *Entkoppeln* mit dem Ziel die funktionsrelevanten Eigenschaften zu reduzieren. Im nächsten Schritt muss die *Sensitivität* der Übertragungsfunktion in Bezug auf Schwankungen der funktionsrelevanten Eigenschaften verringert werden. Danach kann eine *Adaption* des technischen Systems an bestimmte Ausprägungen von Schwankungen erfolgen, bspw. durch Einstellen oder Justieren. Danach bleiben nur das *Verhindern von Schwankungen*

---

<sup>24</sup>Vgl. bspw. EBRO ET AL. (2012), S. 817f.



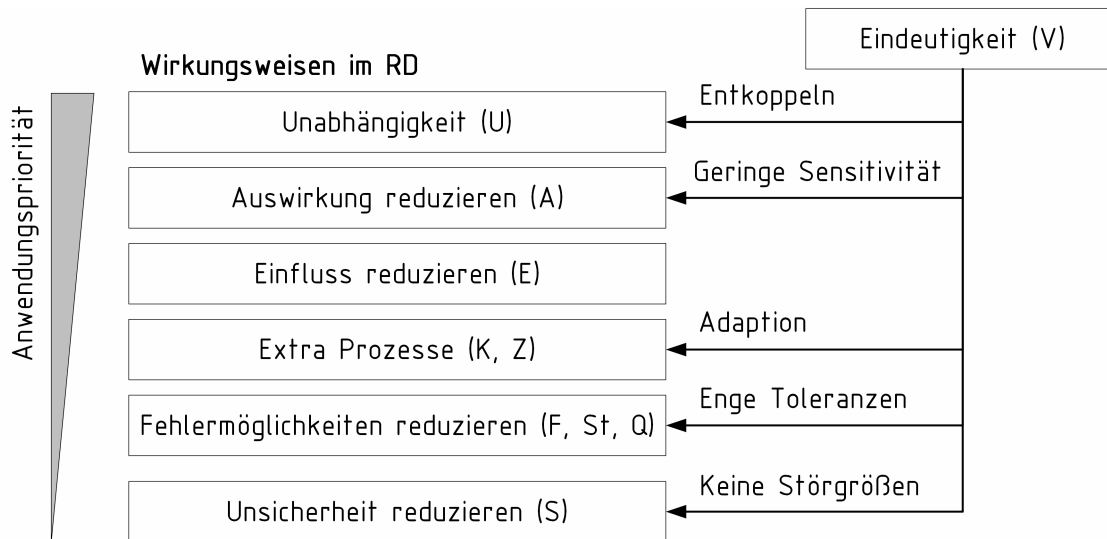


Abbildung 4.20: Leitlinie zur Priorisierung des Einsatzes von RD-Wirkungsweisen.

durch hohe Prozessfähigkeit in der Fertigung und Restriktionen der Nutzungsphase.

### 4.3 Vorgehensmodell der SmArtSys

Zur Anwendung der RD-tauglichen Konstruktionshinweise in der Produktentwicklung bedarf es eines entsprechenden *Vorgehensmodells*, vgl. Abschnitt 2.1. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden allgemeine Konstruktionshinweise aus verschiedenen Bereichen der Konstruktionswissenschaft verwendet, für deren Anwendung in der Produktentwicklung bereits Vorgehensmodelle existieren, vgl. S. 29. Die *SmArtSys*, mit ihrem Fokus auf robusten technischen Systemen, stellt außerdem nur einen kleinen Teil der im Rahmen der Produktentwicklung zu erledigenden Tätigkeiten dar. Es ist daher Ziel dieser Arbeit die *SmArtSys* auf ein bereits existierendes Vorgehensmodell aufzubauen. Hierdurch wird zusätzlich die Akzeptanz der *SmArtSys* in der Anwendung unterstützt, da bekannte Vorgehensweisen beibehalten werden können.

Die Anwendung von Konstruktionshinweisen in der Entwicklung ist in großem Umfang in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur empfohlen, vgl. Abschnitt 2.1.3. Hierbei adressiert die Mehrheit der Werke die Entwicklungsphase der *Gestaltung*, allerdings kann ein Teil der Hinweise bereits in der *Konzeptphase* eingesetzt werden. Entscheidend hierfür ist die Verfügbarkeit von Informationen über die nötigen *Wirkelemente* beschrieben durch *Geometrie-* und *Werkstoffeigenschaften* zur Funktionserfüllung, da Robustheit in Bezug auf schwankende Objekteigenschaften bewertet wird, vgl. Abschnitt 2.2.2. Beispielsweise ist der Einsatz der *Grundregel der Eindeutigkeit* bereits ab *Wirkprinzipenebene*, vgl. Abschnitt 2.1.2, möglich.<sup>25</sup> Die Mehrheit der Konstruktionshinweise unterstützt

<sup>25</sup>Vgl. FREUND ET AL. (2015)(2), S. 109f. ; Vgl. FREUND ET AL. (2015)(1), S. 53f.

jedoch die Phasen der *Grobgestaltung* und der *Feingestaltung*. Damit ergibt sich als *frühestmöglicher* Zeitpunkt zur Verwendung von Konstruktionshinweisen und damit auch der *SmArtSys* die *späte Konzeptphase*.

Das im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Vorgehen muss sich in den übergeordneten Rahmen der *ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE)* nach Birkhofer<sup>26</sup> einfügen, welches in Abschnitt 2.1.3 beschrieben wird. TEKKAYA ET AL. (2015), S. 648, vgl. S. 34, stellen einen Ansatz zur grundsätzlichen Integration von *DfMA* in die *GPPE* vor, vgl. Abschnitt 2.1.3. Hierfür werden im Wesentlichen das bekannte Vorgehen nach VDI 2221 und das von BOOTHROYD ET AL. vorgestellte Vorgehen zur softwarebasierten Umsetzung des *DfMA* kombiniert. Eine Erweiterung des grundsätzlichen Vorgehens von TEKKAYA ET AL. (2015), S. 648 auf die allgemeine Anwendung von Konstruktionshinweisen innerhalb der *GPPE* ist jedoch möglich, da der Wesenskern des Ansatzes, *zusätzliche, erfahrungsbasiert vorliegende Informationen aus Prozessen in der Produktentwicklung zu nutzen*, ebenso für alle anderen Konstruktionshinweise gilt.

MATTHIASSEN, S. 98 stellt für die Arbeit mit Gestaltungsprinzipien im Robust Design ein im Vergleich zu TEKKAYA ET AL. (2015), S. 648 detaillierteres Vorgehensmodell vor, vgl. S. 47. Es zeigt Vorgehensschritte, die für alle Lösungsvarianten eines Produkts durchlaufen werden, vgl. Abschnitt 2.2.3, wobei sich im Wesentlichen Analyse- und Syntheseschritte abwechseln. Dieses Vorgehen wird vor allem dem stark iterativen Charakter der Gestaltungsphase gerecht, vgl. Abschnitt 2.1.3.

Als Synthese der beiden vorgestellten Vorgehensmodelle wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Vorgehensmodell entwickelt, vgl. Abbildung 4.21. Es kombiniert die *GPPE* in Analogie zu TEKKAYA ET AL. mit zusätzlichen Vorgehensschritten für die Berücksichtigung von Konstruktionshinweisen. Diese werden parallel zum restlichen Entwicklungsprozess ausgeführt. Hierbei beginnt die mögliche Applikation in der späten Konzeptphase und setzt sich dann bis zur Ausarbeitung fort. In den einzelnen Phasen, und damit auf den einzelnen Konkretisierungsstufen, vgl. Abschnitt 2.1.2, stehen die jeweiligen Entwicklungsstände als Information zur Verfügung. Zusätzlich werden Informationen über den realen Produktlebenszyklus benötigt, wie sie bspw. durch Antizipation von Lebenslaufprozessen mittels Prozessmodellierung gewonnen werden kann.

Das vorgestellte Vorgehen ist also als *zusätzlicher* Entwicklungsschritt parallel zum üblichen Vorgehen nach *VDI 222X* zu verstehen. Entsprechend stellen die mit Hilfe der *SmArtSys* gewonnenen Lösungsvorschläge einen Entwicklungsschwerpunkt, Robustheit, unter vielen dar.

Im Vergleich mit anderen, für das jeweilige Produkt identifizierten, Schwerpunkten muss im Einzelfall abgewogen werden *ob* und *wie* die Maßnahmen zur Steigerung der Robustheit umgesetzt werden. Diese Problematik ist jedoch nicht durch die hier vorgestellte Methode verursacht, sondern eine grundsätzliche Herausforderung in der Gestaltung, vgl. Abschnitt 2.1.3. Die *SmArtSys* besteht grundsätzlich aus zwei generischen Vorgehensschritten, vgl. Abbildung 4.21, die für alle Entwicklungsphasen, jeweils für jede

---

<sup>26</sup>Vgl. BIRKHOFER ET AL. (2012), S. 566.

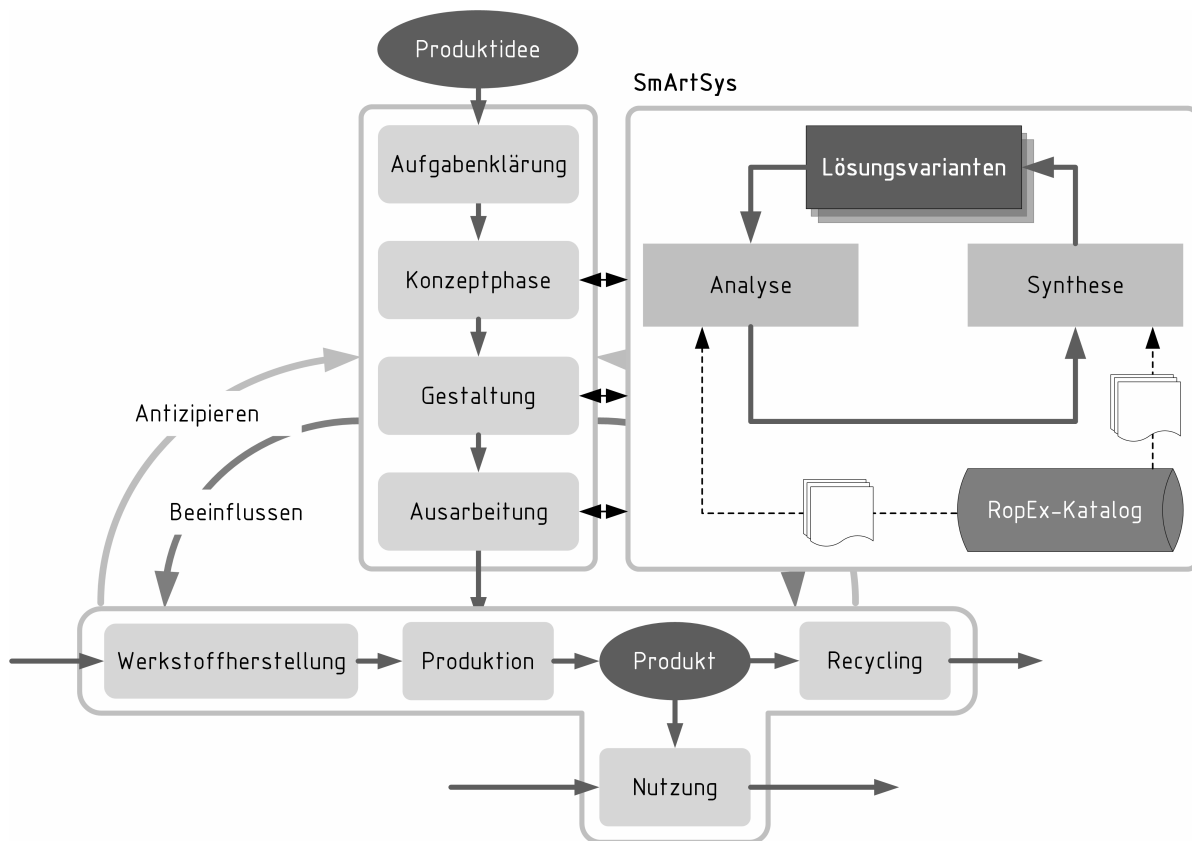


Abbildung 4.21: Einordnung der *SmArtSys* in die *GPPE*.

Lösungsvariante, jeden Prozess des Produktlebens und jeden Konstruktionshinweis je nach Bedarf auch mehrfach durchlaufen werden.<sup>27</sup>

- *Analyseschritt*

Bei der Analyse werden Lösungsvorschläge mit robustheitsförderlichen Konstruktionshinweisen aus dem *RopEx-Katalog* verglichen. Hierbei werden gemeinsame Merkmale identifiziert. Diese Tätigkeit erfolgt am besten in Form eines *Design Review* mit einer Gruppe von Experten. Das Ergebnis ist eine Einschätzung ob ein Konstruktionshinweis in der Lösungsvariante umgesetzt wurde oder nicht.

- *Syntheseschritt*

Im Syntheseschritt werden die im Rahmen der Analyse identifizierten, bisher nicht angewendeten, RD-tauglichen Konstruktionshinweise einzeln umgesetzt. Hierbei entstehen neue Lösungsvarianten.

Im Detail gliedert sich das in Abbildung 4.21 vorgestellte Vorgehen wie in Abbildung 4.22 dargestellt auf. Es ist direkt an das taktische Gestalten während der PE, vgl. Abschnitt 2.1.3, angelehnt. Damit fügt sich das Vorgehen in den Gestaltungsprozess ein, ohne dass neue grundsätzliche Vorgehensweisen implementiert werden müssen. Dies fördert die Akzeptanz der Maßnahmen bei Unternehmen und Entwicklern.

Den Ausgangspunkt bildet ein zu untersuchender Konstruktionsbereich des technischen Produktes. Im ersten Schritt erfolgt die *Analyse* des gewählten Bereiches unter Berücksichtigung der im *RopEx-Katalog* abgelegten Hinweise. Je nach konkreter Fragestellung, kann nach drei verschiedenen *Vorgehensweisen* verfahren werden:

- *Produktorientiertes Vorgehen*

Das Vorgehen stellt einzelne Produktbereiche während des gesamten Produktlebenszyklus in den Mittelpunkt. Hierbei können Synergien und Konflikte zwischen verschiedenen Lösungsvarianten über die unterschiedlichen Lebenszyklen ermittelt werden.

- *Prozessorientiertes Vorgehen*

Dieses Vorgehen eignet sich besonders, um einen bestimmten Prozess wie bspw. die Fertigung mit seinen Wechselwirkungen in Bezug auf mehrere Teilsysteme des technischen Produktes zu untersuchen. Es bietet sich für intensive, detaillierende Fokusworkshops an, bei denen nur die thematisch direkt betroffenen Teammitglieder teilnehmen müssen. Durch das Vorgehen wird es begünstigt Erfahrungen aus einer bestimmten Teillösung für einen konkreten Prozessschritt auf andere Teillösungen zu übertragen.

- *Hinweisorientiertes Vorgehen*

Wenn erfahrungsgemäß bestimmte Hinweise in bestimmten Entwicklungsumfeldern zu sehr guten Lösungen führen, kann es sinnvoll sein diese Hinweise in den Fokus zu stellen und ausgehend davon Lösungen zu suchen.

---

<sup>27</sup>Vgl. hierzu auch LEMBURG (2009), S. 81f.

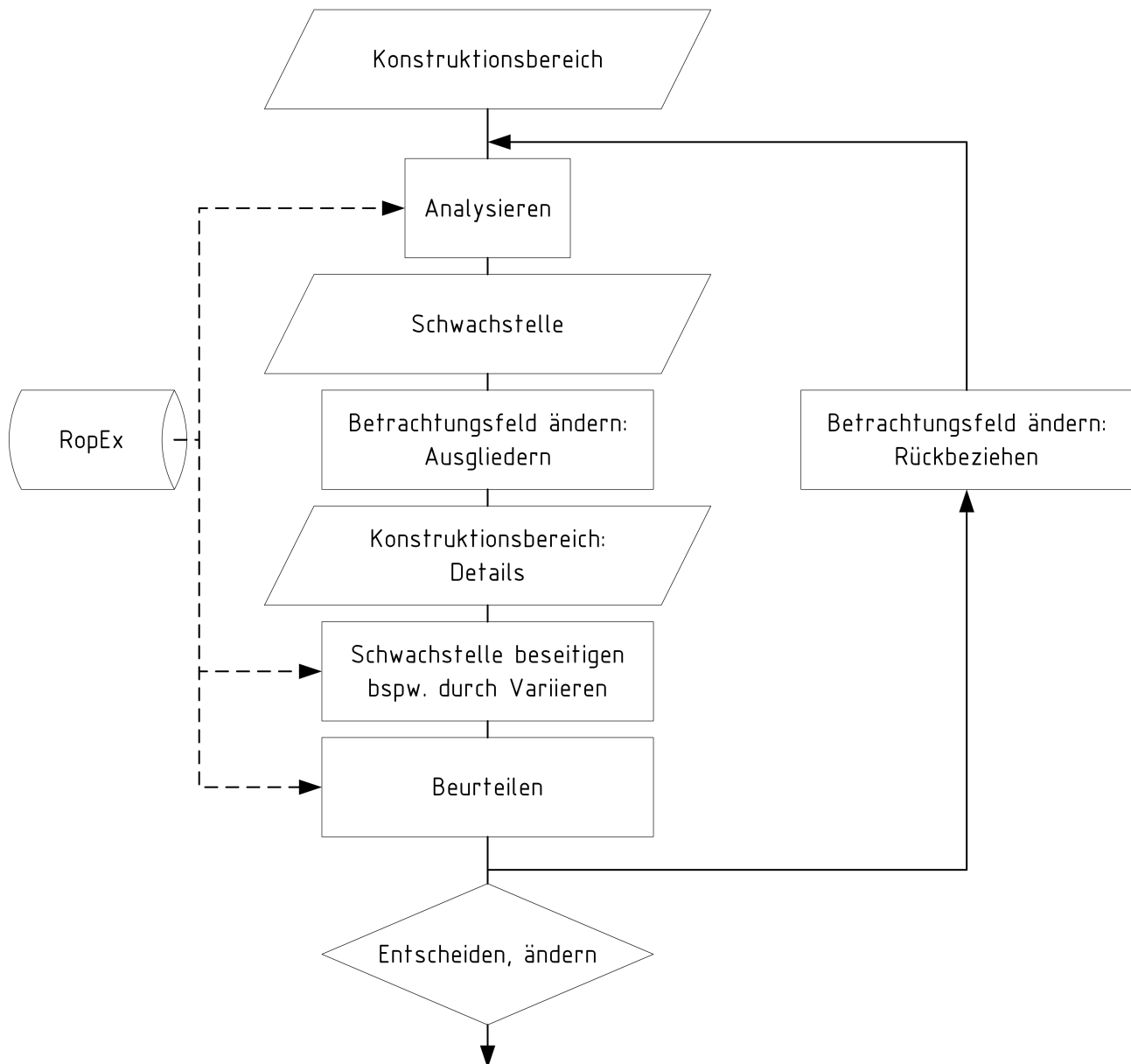


Abbildung 4.22: Detailliertes Vorgehensmodell der *SmArtSys*.

Ergebnis der Analyse bilden identifizierte Schwachstellen innerhalb des Konstruktionsbereiches. Meist betreffen diese Schwachstellen nicht den vollständigen Konstruktionsbereich, daher werden jeweils die relevanten Teile des Konstruktionsbereiches ausgegliedert. Im nächsten Schritt erfolgt die eigentliche Synthese, das Anpassen der Teillösung unter Berücksichtigung des jeweiligen Hinweises. Hierbei versucht der Entwickler das ihm zur Verfügung stehende Erfahrungswissen in Form von gut/schlecht-Beispielen oder Vorbildern auf das vorliegende Problem zu übertragen. Dies führt auf neue Lösungsvarianten, deren Tauglichkeit nachzuweisen ist. Entsprechend muss eine Beurteilung der Lösungsvariante erfolgen. Zum Schluss ändert der Entwickler durch Rückbezug in den Konstruktionsbereich das Betrachtungsfeld ein weiteres Mal. Dieses Vorgehen wird wiederholt bis alle relevanten Konstruktionsbereiche für alle relevanten Hinweise in allen relevanten Lebenszyklusprozessen bearbeitet wurden. Im Anschluss muss sich dann ein Entscheidungsprozess anschließen, der auf Basis der Beurteilung das Lösungsfeld reduziert.

Zur Illustration der *SmArtSys* wird an einem einfachen technischen System eine Analyse-Synthese-Schleife durchgeführt. Hierbei kommt der Konstruktionshinweis *Eindeutigkeit* zum Einsatz, dessen RD-Wirkungsweise auf S.76 erläutert wird. Abbildung 4.23 zeigt auf der linken Seite eine Lösungsvariante für eine *Linearführung*. Es handelt sich dabei um einen Demonstrator für Unsicherheit aus dem *SFB 805*. Der Demonstrator besteht aus einem *Schlitten*, im Bild rot dargestellt, der durch zwei runde *Stangen* linear geführt wird. Jede der Stangen läuft dabei durch zwei konzentrische Bohrungen an den Seiten des Schlittens. Die Stangen sind jeweils an den Enden eingespannt. Der Schlitten kann über den *Knauf* in der Schlittenmitte von Hand verschoben werden. Zur Berücksichtigung von Schwankungen in Objekteigenschaften kann an einem Lager eine Verschiebung  $t$  aufgebracht werden, vgl. Abbildung 4.23.

Bei der Anwendung der *SmArtSys* werden nun Konstruktionshinweise genutzt, um die Lösungsvariante zu untersuchen. Beispielhaft wird die vorliegende Linearführung in Bezug auf die Erfüllung der *Grundregel der Eindeutigkeit* hin untersucht. Da die Grundregel der Eindeutigkeit statische Bestimmtheit fordert, muss diese für das System Linearführung unter Berücksichtigung von Unsicherheit analysiert werden. Abbildung 4.24 zeigt das Freikörperbild der Linearführung. Eingeprägte Kräfte sind in schwarz dargestellt, Reaktionskräfte in blau und Schnittkräfte in rot. Durch die Verschiebung  $t$  entsteht eine Durchbiegung der Stange in der  $xy$ -Ebene und eine entsprechende Kraft  $F_t$ . Da die zylindrischen Wirkflächenpaare zwischen Führung und Schlitten Kräfte in  $y$ -Richtung übertragen können, entstehen an allen vier Wirkflächenpaaren Pressungen, die zu Reibkräften in  $x$ -Richtung führen, sobald eine Kraft  $F_{\text{Stell}}$  auftritt. Im Freikörperbild werden keine Schnittmomente an den zylindrischen Wirkflächenpaaren des Schlittens berücksichtigt. Dies beruht auf der Annahme, dass die geringe Breite der zylindrischen Wirkflächen dazu führt, dass dort kein Moment übertragen werden kann. Allerdings stellt dies eine Vereinfachung dar. Die Höhe der Kraft  $F_t$  hängt von der Position des Schlittens ab, da die freie Länge  $l_s$  der Stange zum Lager hin die Systemsteifigkeit beeinflusst. Eine Verkürzung der freien Länge führt so zu einer Versteifung des Systems



und damit zu höheren Kräften  $F_t$ . Abbildung 4.23 rechts zeigt experimentell ermittelte Stellkräfte zum Verschieben des Schlittens unter Berücksichtigung von Unsicherheit in der Parallelität der beiden Stangen. Im Experiment wird der Schlitten mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit vom Festlager auf das Loslager zu verfahren und die Stellkräfte aufgezeichnet. Für sehr kleine Verschiebungen  $t$  ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede in den Stellkräften, doch schon bei einem Wert von  $t = 0,5 \text{ mm}$  -die Gesamtlänge der Führung beträgt  $400 \text{ mm}$ - ist ein starker Anstieg der Stellkräfte zu beobachten, was die analytisch angestellten Überlegungen zur Funktionsweise unter Unsicherheit stützt. Das Experiment zeigt, dass schon kleine Verschiebungen  $t$  zu sehr großen Schwankungen in der Stellkraft der Linearführung führen. Die Unsicherheit in der Parallelität der Stangen hat also eine sehr große Auswirkung auf die Stellkraft, die zur Beurteilung der Funktionserfüllung dient, das System verhält sich nicht robust. Am Teilsystem der oberen Stange, vgl. Abbildung 4.24, existieren insgesamt 7 Unbekannte, wenn die Kraft  $F_t$  aufgeprägt ist. An der unteren Stange sind es 8 Unbekannte, vgl. Abbildung 4.24. An jedem der Teilsysteme stehen zur Lösung in der Ebene 3 Gleichgewichtsbedingungen zur Verfügung, hinzu kommen insgesamt 4 Reibgesetze. Für die eindeutige Bestimmung der 15 unbekannten Kräfte stehen also nur 13 Gleichungen zur Verfügung. Das System ist 2-fach statisch überbestimmt und erfüllt damit die Grundregel der Eindeutigkeit nicht.

An den *Analyseschritt* schließt sich der *Syntheschritt* der *SmArtSys* an, vgl. Abschnitt 4.3, wobei die Ergebnisse der Analyse als Grundlage dienen, um robustere Lösungen zu generieren. Die statische Untersuchung der Linearführung zeigt eine 2-fache Überbestimmtheit. Entsprechend müssen aus dem System 2 Zwänge nach Abbildung 4.24 entfernt werden, um die Grundregel der Eindeutigkeit zu erfüllen. Durch die  $Z_U = 11$  unabhängigen Zwänge, die Reibkräfte  $F_{Ri}$  und die Normalkräfte  $F_{Vi}$  sind über die Reibgesetze verknüpft, ergeben sich nach der GAUSS<sup>28</sup>-schen Summenformel

$$\frac{Z_U^2 + Z_U}{2} = 66 \quad (4.1)$$

mögliche Lösungen. Besonders geschickte Lösungen entstehen hierbei durch Entkoppelung der Teilsysteme voneinander, vgl. die *Grundregel der Unabhängigkeit* in Abschnitt 7.1.1. Abbildung 4.26 zeigt ein Beispiel für eine solche Lösung. Durch Entfernen zweier zylindrischer Wirkflächenpaare zwischen der unteren Stange und dem Schlitten entsteht nach dem Freikörperbild in Abbildung 4.25 ein System, bei dem zur Bestimmung der 11 unbekannten Größen insgesamt 9 Gleichgewichtsbedingungen und 2 Reibgesetze zur Verfügung stehen. Das System ist also eindeutig statisch bestimmt. Zusätzlich ist die untere Stange in der  $xy$ -Ebene vollständig von der oberen Stange und dem Schlitten entkoppelt. Das Experiment zur Ermittlung der Stellkraft liefert über der gesamten Länge nahezu konstante Stellkräfte, die ausschließlich aus der Gewichtskraft des Schlittens und der daraus resultierenden Reibung entstehen. Eine Verschiebung  $t$  am Lager führt nur zu sehr niedrigen Schwankungen in der Stellkraft  $F_{\text{Stell}}$ .

---

<sup>28</sup> Johann Carl Friedrich Gauß (\* 30. April 1777 in Braunschweig; † 23. Februar 1855 in Göttingen) war ein deutscher Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker.



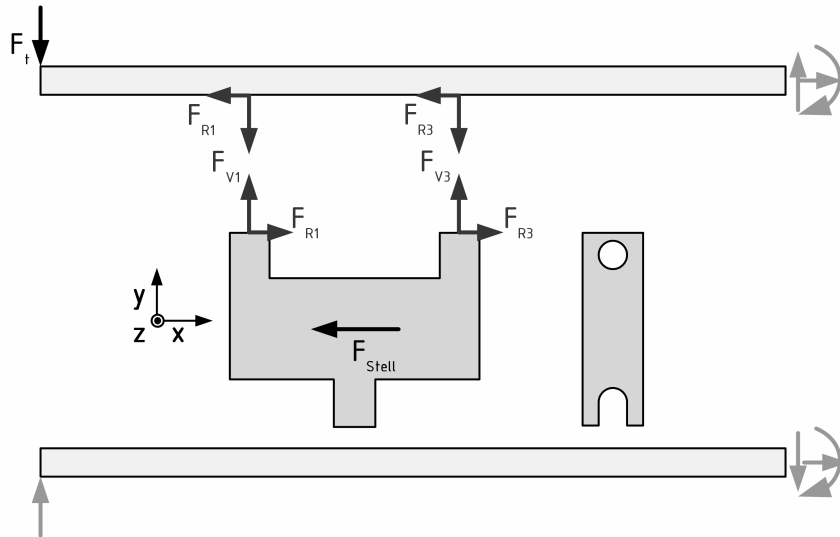


Abbildung 4.25: Freikörperbild einer statisch bestimmten Variante der Linearführung.

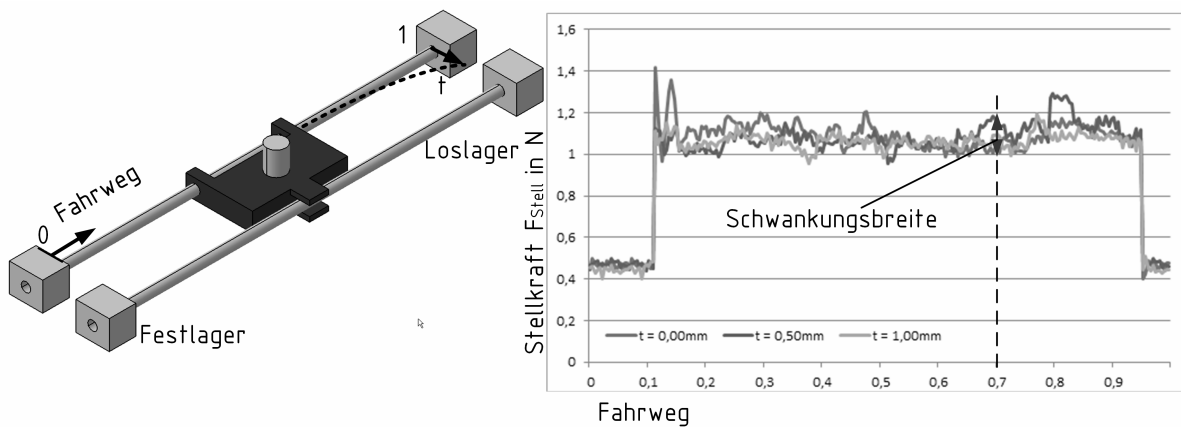


Abbildung 4.26: Linearführung in einer Variante mit statisch bestimmtem Schlitten. Links: 3D-Modell. Rechts: Experimentell ermittelte Stellkräfte in Abhängigkeit von der Schlittenposition für verschiedene Verschiebungen  $t$ .

Ein Vergleich der beiden Lösungen zeigt einen deutlichen Unterschied im Verhalten unter Unsicherheit. Bei der uneindeutigen Lösung sind die Stellkräfte zum einen abhängig von der Position des Schlittens, zum anderen entstehen durch die aufgebrauchte Verschiebung  $t$  Schwankungen. Abbildung 4.23 zeigt diese beispielhaft für die Position 0,7 des Schlittens. Durch eine Schwankungsbreite von 0,7 mm in der Verschiebung  $t$ , dies entspricht bezogen auf die Länge der Führung einem Wert von 0,0175 %, entsteht eine Schwankungsbreite von 480 % in der Stellkraft. Bei der eindeutigen Lösung, vgl. Abbildung 4.26, führt dieselbe Schwankungsbreite der Verschiebung  $t$  auf eine Schwankung von 120 % in der Stellkraft. Im direkten Vergleich ist die Schwankungsbreite der eindeutigen Führung also um den Faktor 4 kleiner, wobei die Unterschiede in der Stellkraft sogar noch deutlich stärker ausfallen. Für die Verschiebung  $t = 0,625$  mm kann im Kraft-Weg-Diagramm der uneindeutigen Lösung 24 N abgelesen werden, die korrespondierende Stellkraft am eindeutigen Schlitten ergibt sich zu etwa 1,1 N, was insgesamt einer Verringerung der Stellkraft um den Faktor 22 entspricht. Die eindeutige, Lösung kann also die Robustheit der Linearführung deutlich steigern, was durch das Experiment bestätigt wird.

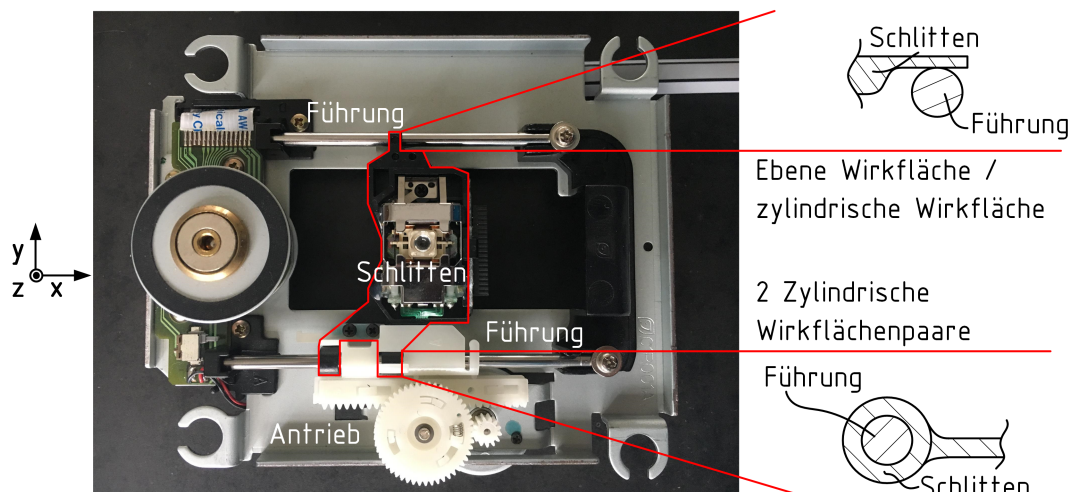


Abbildung 4.27: Robuste Ausführung einer Linearführung in einem DVD-Player.

Abbildung 4.27 zeigt die Übertragung der Ergebnisse auf ein optotechnisches Massenprodukt. Der Schlitten des gezeigten DVD-Players ist auf der Antriebsseite über zwei zylindrische Wirkflächenpaare linear geführt. Auf der gegenüberliegenden Seite liegt der Schlitten nur auf der Stange auf, das System entspricht damit in der xy-Ebene exakt der am akademischen Beispiel abgeleiteten Lösungsvariante. Schwankungen aus der Montage oder der Fertigung der Einzelteile der Führung haben damit keine Auswirkung auf die Stellkraft.

## 5 Konstruktionshinweise zur Entwicklung robuster Systeme

In Abschnitt 4.2 werden die verschiedenen Wirkungsweisen von RD-Maßnahmen zusammengestellt. Auf Basis dieser Charakterisierung ist es im nächsten Schritt möglich allgemeine Konstruktionshinweise in Bezug auf Potentiale zur Erhöhung der Robustheit einzustufen, indem die Wirkung einzelner allgemeiner Hinweise mit den RD-Wirkungsweisen abgeglichen wird, vgl. Abbildung 5.1. Als Grundlage zur Beurteilung

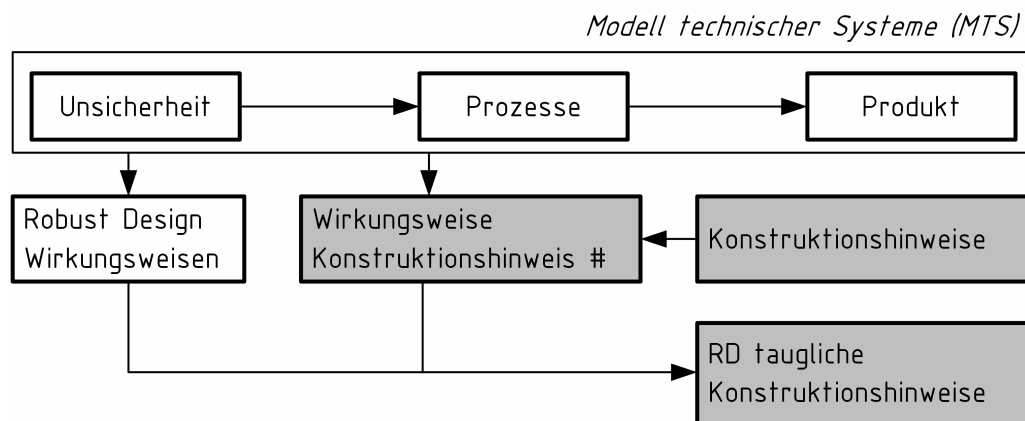


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen dem MTS, den RD-Wirkungsweisen, der Wirkung von Konstruktionshinweisen und den für das Robust Design geeigneten Konstruktionshinweisen.

der Eignung von Konstruktionshinweisen im RD wird eine große Menge allgemeiner Konstruktionshinweise benötigt, die mittels einer *Literaturrecherche* in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur gewonnen werden, vgl. Abschnitt 5.1. Im Anschluss erfolgt die *Einstufung der Konstruktionshinweise*, vgl. Abschnitt 5.2, wobei auch die Unsicherheit bei der Einstufung reflektiert werden muss, um die Ergebnisse der Arbeit richtig einordnen zu können.

## 5.1 Identifikation von Konstruktionshinweisen

Zur Überprüfung der Eignung von allgemeinen Konstruktionshinweisen für das Robust Design muss eine große Menge an Konstruktionshinweisen untersucht werden.<sup>1</sup> Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine umfassende Literaturrecherche in der konstruktionswissenschaftlichen und technischen Literatur durchgeführt.

### 5.1.1 Aufbau der Literaturrecherche

Das Vorgehen bei der Ermittlung der Konstruktionshinweise zeigt Abbildung 5.2. Die Ausgangsbasis bildet Literatur aus dem *konstruktionswissenschaftlichen Bereich* und dem *RD-Bereich*. Für den Zugriff auf *konstruktionswissenschaftliche Literatur* dient zunächst die *Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt (ULB)*, wobei alle vorrätigen Werke der Kategorie *Maschinenkonstruktion, Konstruieren allgemein, Konstruktionsmethodik* berücksichtigt werden. Des weiteren werden inhaltlich passende Veröffentlichungen des *Fachgebietes für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)* berücksichtigt.

Aus dem Bereich der *Robust Design Literatur* werden verschiedene, thematisch passende Werke aus dem Kontext des SFB 805 und der *Special interest Group Robust Design (RDSIG)* der *Design Society (DS)* berücksichtigt, vgl. Abschnitt 2.2.3. Die so gewonnene Literatur wird, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, einzeln von Hand in Bezug auf Konstruktionshinweise analysiert. Enthält ein Werk Konstruktionshinweise, wird der entsprechende Abschnitt mit Literaturverweis in einer *Excelliste* gespeichert. Zusätzlich werden die etwaigen Quellen des Abschnittes in die Literaturdatenbank aufgenommen, vgl. Abbildung 5.3, und die durch den Hinweis unterstützten Lebenslaufphasen eingestuft, um zwischen Hinweisen zur Unterstützung der Produktion und Hinweisen zur Unterstützung der Nutzungsphase unterscheiden zu können. Zur Literaturverwaltung kommt *Citavi* zum Einsatz. Das beschriebene Vorgehen wird wiederholt bis alle Werke in der Literaturdatenbank ausgewertet sind.

Auf Basis des beschriebenen Vorgehens ergibt sich eine Literaturdatenbank von insgesamt 161 Werken, vgl. hierzu Tabelle A.1 in Anhang A, denen 1380 einzelne Konstruktionshinweise, zunächst ohne Überprüfung der möglichen Anwendung im RD, entnommen werden können. Das Excel-Dokument mit allen berücksichtigten Hinweisen befindet sich aus Platzgründen im elektronischen Anhang der Arbeit. Die gefundenen Konstruktionshinweise stellen die Datenbasis für den *RopEx-Katalog* dar.

Viele Werke werden mehrfach referenziert. Um einen Überblick über die Relationen der Werke und korrespondierenden Autoren zu erhalten, werden die Verweise der Werke untereinander in einer *Citavi*-Datenbank erfasst. Diese Relationen dienen der Identifikation von Hauptwerken und -autoren im Feld von Konstruktionshinweisen. Zur Identifikation der Hauptwerke werden die untersuchten Werke als Knoten interpretiert, wobei alle Auf-

---

<sup>1</sup>Vgl. ANDERSSON (1996)(1), S.73.

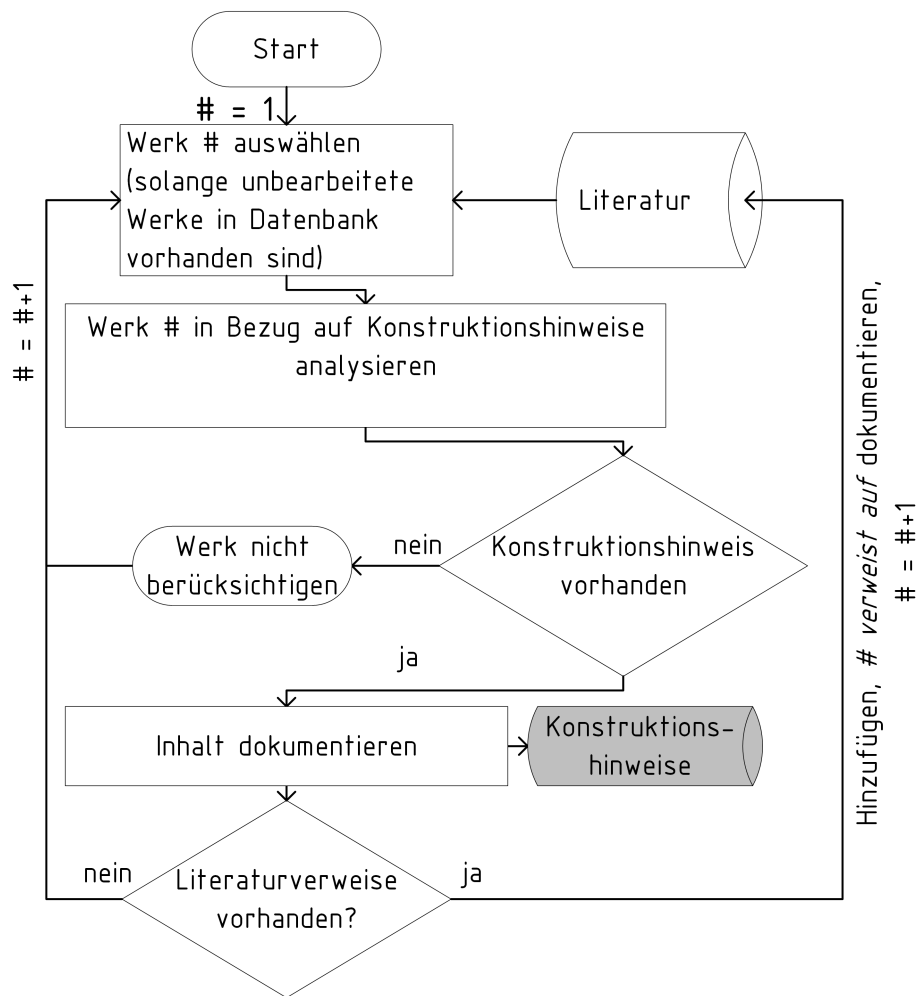


Abbildung 5.2: Vorgehen zur Identifikation von Konstruktionshinweisen in der Fachliteratur.

| RD Tauglichkeit                               |  |   | RD geeignet | RD-Wirkungs-<br>weise | Art des<br>Hinweises | Lebenslauf-<br>phase |
|---|--|---|-------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Dokumentation Hinweis                         | Literaturquelle/n  | Erklärung   |             |                       |                      |                      |
| Gestaltungshinweis                            | Quelle   | Erklärung   |             |                       |                      |                      |
| Themenfeld "Eindeutig"                        |  |   |             |                       |                      |                      |
| eindeutig                                     | Feldhusen, J., et al. (2013), S.492.; Andersson, P. (1997), S.80.; Conrad, K.-J. (2004), S.391; French, M. J. (1994), S.229; French, M. J. (1992), S.210; Steinhilper, W./ Sauer, B. (2012), S.174–175 | genausoviele lösungsbestimmende Eigenschaften wie nötig | +           | V                     | x                    | x x x x x x x        |
| eindeutige Funktion anstreben                 | French, M. J. (1999), S.212  |   | +           | V                     | x                    | x                    |
| Prinzip des Vermeidens von Überbestimmtheiten | Krause, W./ Bürger, E. (2000), S.136–140   | Zwang im System durch zu viele Unfreiheiten vermeiden.  | +           | V                     | x                    | x x                  |

Abbildung 5.3: Struktur der Excel-Liste zur Dokumentation der Literaturrecherche.

lagen zusammengefasst behandelt werden. Die Verweise zwischen den Werken werden als gerichtete Kanten verstanden. Eine Gewichtung der Kanten erfolgt nicht. Entsprechend werden die Verweise in *Citavi* von einem berücksichtigten Hinweis in einem Werk aus in Richtung auf das referenzierte Werk vorgenommen. Mit steigender Referenzierung steigt der Eingangsgrad des dem Werk zugeordneten Knotens. Abbildung 5.4 zeigt Werke und ihre Vernetzung mit Eingangsgrad  $\geq 1$ . Die Schrift ist entsprechend der Anzahl der Referenzierungen skaliert. Die Färbung dient der zusätzlichen Differenzierung, wobei rot die maximale Anzahl von Referenzierungen darstellt. Ein Vernetzungsgrad von  $\leq 2$  ist in orange dargestellt.

Auf einen Großteil der Titel wird insgesamt nur einmal verwiesen. Nur wenige Titel beziehungsweise Autoren werden hingegen mehr als fünf mal genannt und werden daher im Folgenden als *Hauptautoren* bezeichnet. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der Hauptwerke in abgestufter Reihenfolge nach Anzahl der Referenzierungen. Das am meisten zitierte Werk ist mit 31 Verweisen *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*<sup>2</sup>, was die Rolle als Standardwerk in der Konstruktionswissenschaft untermauert. In *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* sind *Gestaltungshinweise* in Form von *Grundregeln der Gestaltung*, *Gestaltungsprinzipien* und *Gestaltungsrichtlinien* enthalten. Auf die Werke von FRENCH<sup>3</sup> entfallen insgesamt 18 Referenzierungen. Er veröffentlicht in seinem Werk „An annotated list of design principles“ eine umfassende,

<sup>2</sup>Gerhard Pahl (\* 25. Juni 1925; † 18. Oktober 2015) war ein weltweit geachteter, deutscher Maschinenbauingenieur. Er war von 1965 bis 1990 Professor im Fachbereich Maschinenbau der *Technischen Hochschule Darmstadt*.

<sup>3</sup>Michael Joseph French (\* 8. Juli 1925; † 24. Februar 2015) war der Gründer und Direktor des Bereichs *Ingenieurwissenschaften* der *Universität Lancaster*.



Tabelle 5.1: Liste mit Hauptautoren.

| Eingangsgrad | Autoren   |
|--------------|---|
| 31           | FELDHUSEN ET AL. bzw. PAHL und BEITZ mit <i>Pahl/Beitz Konstruktionslehre</i>           |
| 18           | FRENCH mit: FRENCH (1992a); FRENCH (1992b); FRENCH (1993); FRENCH (1994); FRENCH (1999) |
| 11           | SUH mit: SUH (1990); SUH (2001)   |
| 9            | ROTH mit: ROTH (2000); ROTH (2001)  |
| 6            | MATTHIASSEN (1997)  |
| 5            | ANDERSSON (1997)(1); LEYER (1964)   |
| 4            | BOOTHROYD ET AL. (2011); EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013); VDI 2223 (2004)                |
| 3            | EBRO ET AL. (2012); KOLLER (1998); NIEMANN ET AL. (2005)                                |

lungen mit Hilfe von BOOLE'sch<sup>10</sup>-verknüpften *Schlussmatrizen*<sup>11</sup> die Grundlage für die von FREUND (2015, 2016) zur Beurteilung von Eindeutigkeit verwendeten Ansätze dar. MATTHIASSEN befasst sich in seinem Werk „Design for robustness and reliability: Improving the quality consciousness in engineering design“ mit *Principles* zur Steigerung der Robustheit und Zuverlässigkeit<sup>12</sup>. Thematisch ist das Werk damit eine der wenigen direkten Grundlagenarbeiten für diese Arbeit, da dort explizit die Verwendung von Erfahrungswissen zur Entwicklung robuster Produkte diskutiert wird. Die von MATTHIASSEN vorgestellten *Principles* sind als Teil des *RopEx-Kataloges* im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt.

### 5.1.2 Einheitliches Begriffssystem

Die in der Literatur verwendeten Begriffe zur Beschreibung und Unterscheidung von verschiedenen Arten von Erfahrungswissen zur Verwendung in der Produktentwicklung sind, je nach Autor, sehr unterschiedlich. In der englischsprachigen Literatur besteht dieses Problem durch die übliche Verwendung des wenig granularen Terminus *Design* in Zusammenhang mit Hinweisen aller Art nicht. Auf der anderen Seite ist damit eine Zuordnung zu verschiedenen Entwicklungsphasen allein durch die sprachliche Unterscheidung im Englischen nicht möglich. In der deutschsprachigen Literatur existiert historisch bedingt eine große Vielfalt von Begriffen, wobei, auch durch die starke Verbreitung bedingt, FELDHUSEN ET AL. mit der Unterteilung in *Grundregel der Gestaltung*,

---

<sup>10</sup>George Boole (\* 2. November 1815 in Lincoln, England; † 8. Dezember 1864 in Ballintemple, Irland) war ein englischer Mathematiker (Autodidakt), Logiker und Philosoph.

<sup>11</sup>Vgl. ROTH (2000), S. 154-166, 193.

<sup>12</sup>Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 103-215.



*Gestaltungsprinzip* und *Gestaltungsrichtlinie* und der Klassifizierung der Hinweise nach *Übertragbarkeit* und *Konkretisierungsstufe* die allgemeine Wahrnehmung prägen. Der von FELDHUSEN ET AL. in Zusammenhang mit Erfahrungswissen verwendete Wortbestandteil *Gestaltung* deutet auf eine Verwendbarkeit der Hinweise während der Entwicklungsphase der *Gestaltung*<sup>13</sup> hin. Einige der gefundenen Prinzipien und Grundregeln lassen sich jedoch bereits früher im Entwicklungsprozess einsetzen.<sup>14</sup> ROTH, S.193 verwendet den übergeordneten Begriff der *Konstruktionsregel* für alle Hinweise unabhängig von der Entwicklungsphase<sup>15</sup>, was für diese Arbeit ebenfalls zweckmäßig erscheint, vgl. Abschnitt 4.3, und daher übernommen wird. Zusätzlich wird als *Hinweissystem* eine Einteilung nach *Übertragbarkeit* und *Konkretisierungsstufe* gewählt, was der starken Dominanz des Verständnisses nach dem Werk *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* geschuldet ist, vgl. Abbildung 5.5. Der Zusammenhang zwischen *Übertragbarkeit* und *Konkretisierungsstufe* ist hierbei reziprok. Je konkreter ein Hinweis ist, desto weniger lässt er sich auf unterschiedliche Probleme übertragen. Im Hinweissystem werden *Grundregeln*, *Prinzipien*

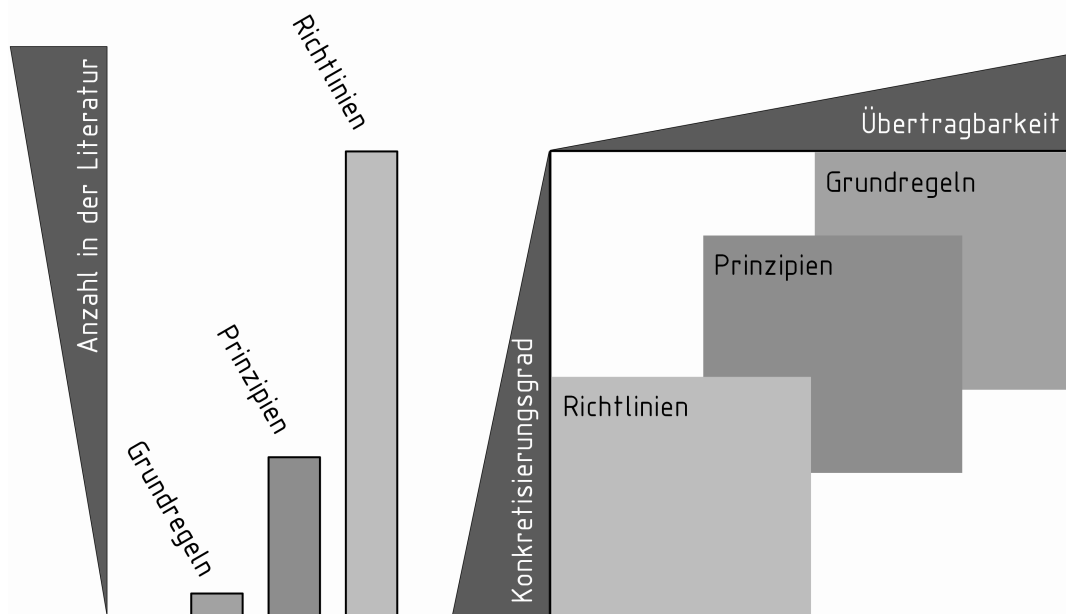


Abbildung 5.5: *Hinweissystem* zur Einordnung von Konstruktionshinweisen nach *Übertragbarkeit* und *Konkretisierungsgrad*, sowie relativer Häufigkeit.

*en* und *Richtlinien* berücksichtigt, wobei durch die Überlappung der Felder eine gewisse Unschärfe in der Einstufung reflektiert wird. Der Wortbestandteil *Gestaltung* wird nicht mehr geführt. Abbildung 5.5 zeigt zusätzlich die Anzahl der in der Literatur gefundenen

<sup>13</sup>Vgl. VDI 2223 (2004).

<sup>14</sup>Vgl. FREUND ET AL. (2015)(2), oder KRAUSE und BÜRGER (2000), S.129.

<sup>15</sup>Vgl. hierzu bspw. SAUER (2006), S.67-68.

Hinweise qualitativ. Während es sehr wenige, dafür allgemein zu beachtende und übertragbare, Grundregeln gibt, ist eine sehr große Menge problemspezifischer Richtlinien verfügbar, deren Übertragbarkeit jedoch gering ist. Aufbauend auf die Ausführungen in diesem Abschnitt und in Abschnitt 2.1.3, wird übergeordnet Definition 5.1.1 getroffen.

### **Definition 5.1.1.: Konstruktionshinweis**

*Konstruktionshinweise* bezeichnen im Folgenden erfahrungsbasiert<sup>16</sup> gewonnene Handlungsempfehlungen in Form von *Regeln* und *Vorbildern* unterteilt in *Grundregeln*, *Prinzipien* und *Richtlinien*, deren Übertragbarkeit in der Reihenfolge der Nennung abnimmt, während gleichzeitig der Konkretisierungsgrad steigt und umgekehrt.<sup>17</sup> □

*Grundregeln* sind übergeordnete, allgemeingültige Regeln, die möglichst immer zu beachten sind<sup>18</sup>. Sie erfüllen die übergeordneten Forderungen nach minimalen Herstellungskosten, minimalem Raumbedarf, minimaler Masse, minimalen Verlusten und optimaler Nutzung<sup>19</sup>. Ein Beispiel für diese Kategorie sind die drei Grundregeln der Gestaltung *einfach*, *eindeutig* und *sicher*. Die gemeinsame Erfüllung der Grundregeln schließt sich nicht aus, vielmehr unterstützen sich die Regeln gegenseitig.<sup>20</sup> So unterstützt eine einfache Gestaltung z.B. auch eine sichere Auslegung des Systems. In der Literatur verwendete Synonyme sind u. a. die Begriffe *Gestaltungsregel*, *Gestaltungsgrundregel* und *Grundregel des Konstruierens*.

*Prinzipien* sind konkreter formuliert als die Grundregeln und zielen auf bestimmte Bereiche oder Funktionen einer Konstruktion ab<sup>21</sup>. Sie bilden eine Leitlinie bzw. eine grundsätzliche Möglichkeit<sup>22</sup>, anhand derer eine zweckmäßige Gestalt gefunden werden kann<sup>23</sup>. Dabei nutzen Prinzipien meist die in der Struktur selbst bereits vorhandenen Zusammenhänge und physikalischen Effekte.<sup>24</sup> Prinzipien sind nicht allgemein anwendbar und können sich widersprechen. So stellen die Prinzipien der *Differential- und Integralbauweise*<sup>25</sup> zwei entgegengesetzte Möglichkeiten der Bauraumaufteilung dar. Bei der Integralbauweise werden mehrere Bauteile zu einem zusammengefasst, bei der Differentialbauweise wird ein Bauteil aufgeteilt. Der Konstrukteur muss situationsbezogen über die zweckmäßige Anwendung entscheiden.<sup>26</sup>

---

<sup>16</sup>Vgl. EDER (1996), S. 116; vgl. FRENCH (1992a), S. 188.

<sup>17</sup>Vgl. OHMER (2008), S. 7-8.

<sup>18</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 492,494.

<sup>19</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 127.

<sup>20</sup>Vgl. CONRAD (2004), S. 391; vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 492.

<sup>21</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 492.

<sup>22</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 129.

<sup>23</sup>Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 495; vgl. VDI 2223 (2004), S. 65; vgl. FU ET AL. (2016), S. 2.

<sup>24</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 129.

<sup>25</sup>Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 499.

<sup>26</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 128-129.

*Richtlinien* sind nur unter bestimmten Randbedingungen und kontextbezogen<sup>27</sup> nutzbar.<sup>28</sup> Diese Randbedingungen sind gegeben durch Eigenschaften und Anforderungen an das Produkt aus Herstellung, Nutzung oder Vorschriften<sup>29</sup>. Richtlinien können einzelnen Prozessen bzw. Verfahren zugeordnet werden und werden im Deutschen in der Regel als zusammengesetzter Begriff, bestehend aus dem *Zweck* bzw. dem unterstützten Verfahren und dem Wortbestandteil *-gerecht* gebildet, vgl. Abschnitt 2.1.3. Im Englischen werden sie in Zusammenhang mit *DfX* bzw. *DtX* eingesetzt, vgl. ebenfalls Abschnitt 2.1.3. Zielkonflikte sind durch Anwendung unterschiedlicher Richtlinien möglich. Richtlinien bestehen häufig aus tabellarisch angeordneten Informationen in Form von Regeln und illustrierenden gut/schlecht-Beispielen. Die Anwendung der Richtlinien ist erst in Phasen der Entwicklung möglich, wo bereits eine Gestalt existiert, vgl. Abschnitt 2.1.3.

Bei der Dokumentation der Konstruktionshinweise in der *Excel-Liste*, vgl. Abbildung 5.2, wird jeder einzelne Hinweis gemäß Definition 5.1.1 eingestuft, vgl. Abbildung 5.3.

## 5.2 Einstufung der Konstruktionshinweise

Die gesammelten Konstruktionshinweise, vgl. Abschnitt 5.1, müssen in Bezug auf ihre Eignung zur Verwendung im Robust Design beurteilt werden. Hierfür stehen die *elf*, in Abschnitt 4.2 vorgestellten, *RD-Wirkungsweisen* zur Verfügung.

### Vorgehen bei der Einstufung

Abbildung 5.6 zeigt das Flussdiagramm für die Beurteilung der aus der Literaturrecherche, vgl. Abbildung 5.2, gewonnenen Konstruktionshinweise.

Jeder einzelne Konstruktionshinweis in der Datenbank wird in Bezug auf Erfüllung mindestens einer der RD-Wirkungsweisen hin überprüft. Hierfür muss zunächst analysiert werden wie der Konstruktionshinweis grundsätzlich wirkt, daher werden Literaturquellen und dort vorhandene Beispiele untersucht. Üblicherweise werden in der Literatur Unsicherheit, oder Schwankungen nicht explizit erwähnt, eine Analyse der Wirkung der einzelnen Konstruktionshinweise kann jedoch bewusst Schwankungen mit einbeziehen und so eine Beurteilung ermöglichen.<sup>30</sup> Das *MTS*, vgl. Abschnitt 4.1, dient hierbei als Unterstützung, um sich die Wirkung der Hinweise klar zu machen. Kann der analysierte Hinweis mindestens einer der RD-Wirkungsweisen aus Tabelle 4.1 zugeordnet werden, wird er als Teil des *RopEx-Kataloges* gespeichert.

Da zur Einstufung sehr viele, sehr unterschiedliche Informationen verarbeitet werden müssen, ist das Vorgehen bisher nicht automatisierbar und muss aufwändig von Hand

---

<sup>27</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 129; vgl. FU ET AL. (2016), S.3.

<sup>28</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 492.

<sup>29</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 129.

<sup>30</sup>Ebenso stufen EBRO und HOWARD (2016) Prinzipien zur Erhöhung der Robustheit durch Berücksichtigung von Schwankungen in der *Transfer Function* und JUGULUM und FREY (2007) durch Berücksichtigung von Schwankungen im *P Modell* ein.

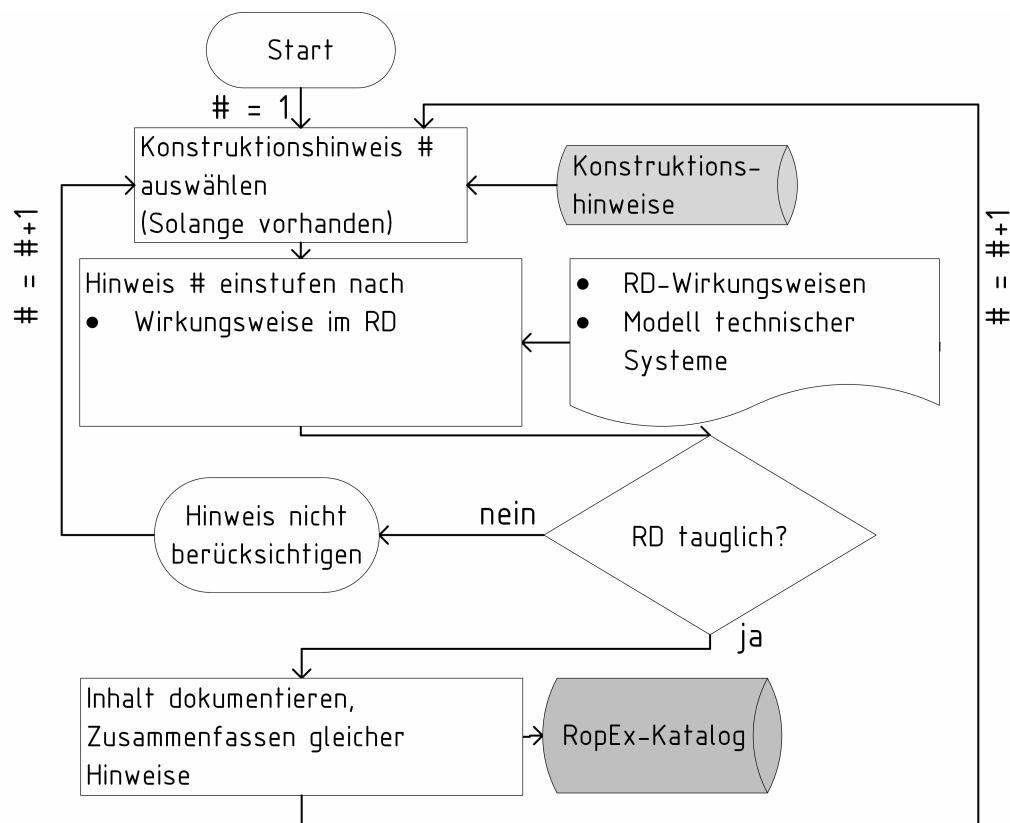


Abbildung 5.6: Flussdiagramm zur Einstufung der Konstruktionshinweise nach *Wirkungsweise im RD*.

erfolgen.

### 5.2.1 Reflektion der Unsicherheit bei der Einstufung

Die *Literaturrecherche* und die *Einstufung der Konstruktionshinweise* erfolgen auf Basis von qualitativen Kriterien durch den Menschen. Als Prozesse sind beide Tätigkeiten *unsicherheitsbehaftet*, zusätzlich weisen die RD-Wirkungsweisen, vgl. Abschnitt 4.2, eine Unschärfe auf. In Abhängigkeit von der Zielsetzung der Einstufung muss diese zusätzliche Unsicherheit reflektiert werden, um die *Belastbarkeit* des Ergebnisses einschätzen zu können. Abbildung 5.7 zeigt die wesentlichen Unsicherheitsquellen auf dem Weg zum *RopEx-Katalog*.

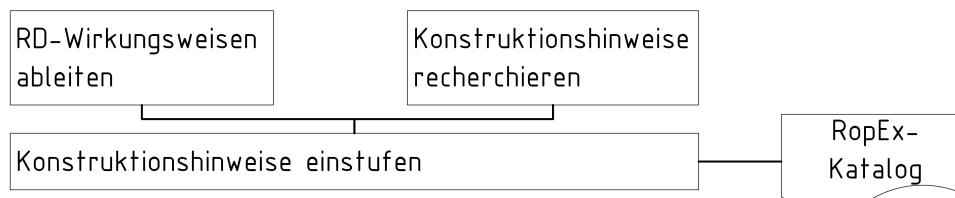


Abbildung 5.7: Unsicherheit bei der Ableitung des *RopEx-Kataloges*.

#### Unsicherheit in RD-Wirkungsweisen

Die *RD-Wirkungsweisen* berücksichtigen den Stand der Forschung zur Beherrschung von Unsicherheit vollständig, indem alle, dem Autor bekannten, RD-Wirkungsweisen zur Einstufung berücksichtigt werden. Die Systematik der Verortung der RD-Wirkungsweisen im MTS, vgl. Abschnitt 4.1, unterstützt zusätzlich dabei Maßnahmen zur Reduktion von Schwankungen zu identifizieren. Als Beispiel hierfür kann die RD-Wirkungsweise *Reduktion von Fehlern durch den Menschen* angeführt werden. Eine Vollständigkeit der RD-Wirkungsweisen, und damit die Erfassung aller möglicher RD-Maßnahmen, ist dabei das erklärte Ziel, zur Absicherung der aus der Literatur und dem MTS gewonnenen RD-Wirkungsweisen wird daher ein zusätzlicher Prozess zur Adaption der RD-Wirkungsweisen in direktem Zusammenhang mit der Einstufung der Konstruktionshinweise implementiert, vgl. Abbildung 5.8.

Trägt ein Hinweis zur Reduktion von Schwankungen bei, kann aber *keiner* der RD-Wirkungsweisen zugeordnet werden, ist dies ein deutliches Zeichen für deren Unvollständigkeit. In der Folge muss eine entsprechende Anpassung vorgenommen werden. Dass dieser Regelkreis funktioniert, wird am Beispiel der RD-Wirkungsweise *Qualität steigern* deutlich, die zu Beginn der Einstufung nicht existierte, vgl. Abschnitt 4.2.1. Erst die Erfahrungen bei der Einstufung der Richtlinien zum *fertigungsgerechten Gestalten* zeigten einen Bedarf auf, dem die RD-Wirkungsweise *Qualität steigern* gerecht wird.

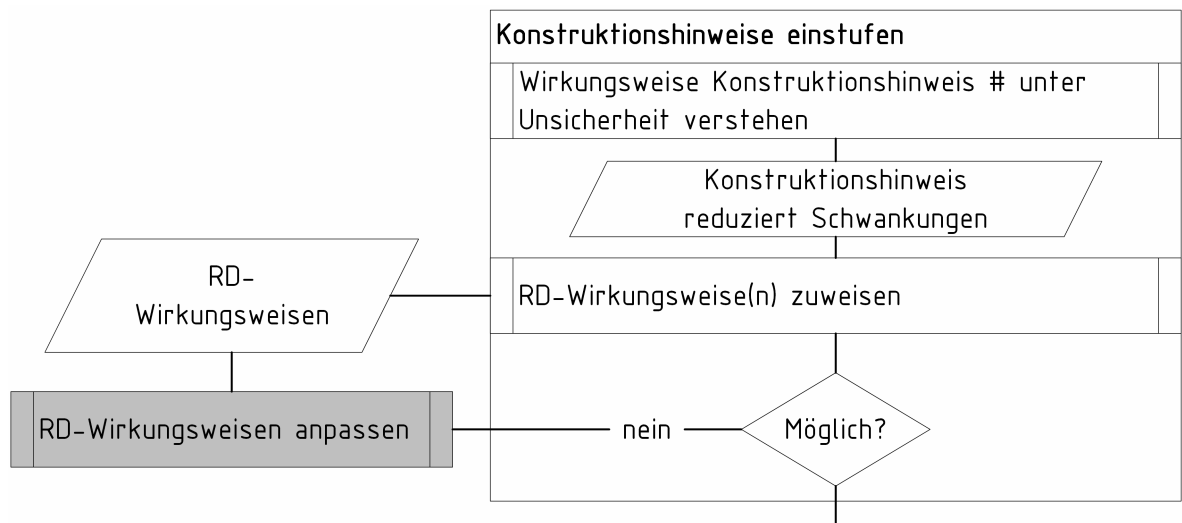


Abbildung 5.8: Flussdiagramm zur Adaption der *RD-Wirkungsweisen*.

### Unsicherheit in der Literaturrecherche

Die Herausforderung bei der Literaturrecherche besteht vor allem darin Konstruktionshinweise gemäß Definition 5.1.1 zu identifizieren, die in der Literatur nicht als solche gekennzeichnet sind. Hierfür ist ein entsprechend großes Verständnis von Konstruktionshinweisen einerseits, aber auch vom konkret untersuchten Werk andererseits, nötig. Dies führt unter Umständen zu erheblichem Aufwand bei der Einstufung, da im Rahmen dieser Arbeit Konstruktionshinweise einer großen fachliche Bandbreite untersucht werden. Beispielsweise wird das *Unabhängigkeitsaxiom* in *The principles of design*, S. 47 f. nicht als Konstruktionshinweis bezeichnet. Erst das Wissen über den *erfahrungsbasierten Ursprung* des Unabhängigkeitsaxioms macht eine Berücksichtigung als Konstruktionshinweis in Form einer Grundregel möglich. Die große fachliche Breite der Hinweise und die begriffliche Vielfalt führen dazu, dass Fehler bei der Identifikation von einzelnen Konstruktionshinweisen unvermeidlich sind. Gleichzeitig ist eine Automatisierung der Literaturrecherche und damit die Vermeidung von menschlichen Fehlern zum jetzigen Stand der Informationsverfügbarkeit unmöglich, da die Hinweise in unterschiedlichen Formaten, in unterschiedlichen Sprachen, in unterschiedlichen Medien und auf Basis unterschiedlicher Begriffe vorliegen. Der Mensch, mit seiner Fähigkeit unscharfe Informationen zu verarbeiten, ist damit zum jetzigen Zeitpunkt für die allgemeine Identifikation von Konstruktionshinweisen unersetzlich.

Das Ziel dieser Arbeit, eine große Menge Konstruktionshinweise unterschiedlicher Konkretisierungsgrade aus den Produktlebensphasen Fertigung, Montage, Nutzung und Instandhaltung auf ihre Tauglichkeit für das RD hin zu untersuchen, ist jedoch trotz der Unsicherheit bei der Identifikation von Konstruktionshinweisen erfüllt, da insgesamt etwa 1400 Hinweise identifiziert werden.

### Unsicherheit bei der Einstufung der Konstruktionshinweise

Die Einstufung der Konstruktionshinweise in Bezug auf ihre RD-Tauglichkeit muss von Hand durch den Menschen erfolgen, da die Konstruktionshinweise in Form von Text und Abbildungen dokumentiert sind. Durch die zusätzlich enorme Sprachvielfalt kann die Semantik der Texte nicht automatisiert erfasst werden. Das Verständnis der Wirkung einzelner Hinweise und die Übertragung der Wirkung auf Unsicherheit erfordert eine Verknüpfung von unsicherer Information mit dem Ziel Wissen zu generieren. Die Einstufung durch den Menschen führt zu Schwankungen, die im Wesentlichen davon Abhängen *wer* die Einstufung durchführt, und *wie oft* die Einstufung erfolgt. Überall wo Experten qualitative Einschätzungen vornehmen, muss die korrespondierende Unsicherheit berücksichtigt werden. In der empirischen Forschung kommen hierfür die *Interrater-Reliabilität* und die *Intrarater-Reliabilität* zum Einsatz.<sup>31</sup> Die *Interrater-Reliabilität* bezeichnet hierbei die Urteilsübereinstimmung mehrerer Beurteiler, während die *Intrarater-Reliabilität* die Urteilsübereinstimmung mehrerer Urteile eines einzelnen Beurteilers bezeichnet. Zur

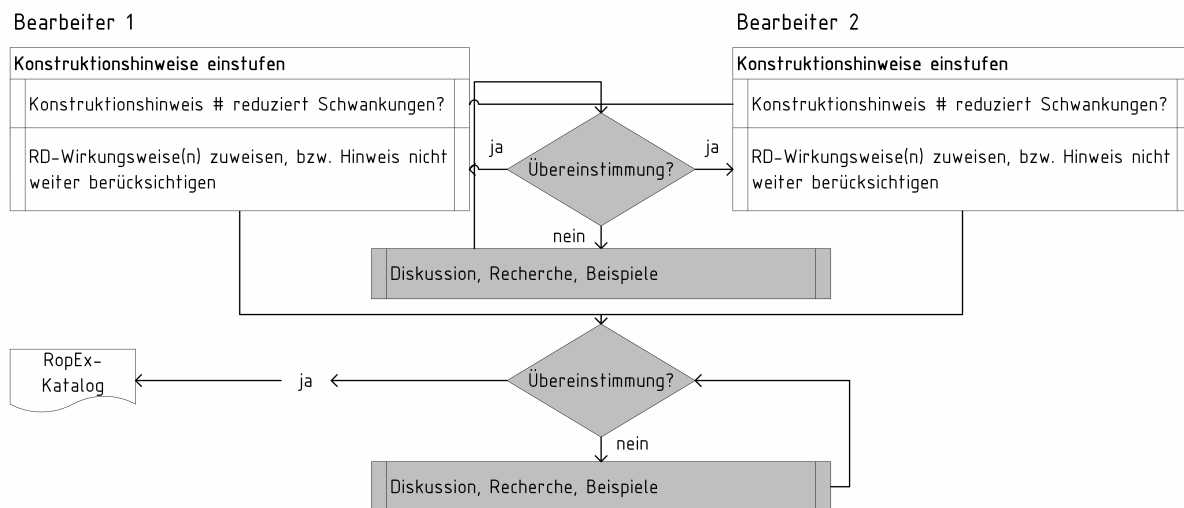


Abbildung 5.9: Flussdiagramm zur Reduktion von Unsicherheit durch verschiedene Beurteiler.

Reduktion der Unsicherheit aus unterschiedlichen Beurteilern werden alle Konstruktionshinweise zunächst getrennt von zwei Personen eingestuft, deren Ergebnisse im Anschluss verglichen werden, vgl. Abbildung 5.9. Dieser Prozess ist zweistufig angelegt, da auch die Beurteilung der einzelnen Hinweise in zwei Schritten erfolgt. Zuerst wird beurteilt, ob ein Hinweis durch seine Wirkung dazu beitragen kann Schwankungen zu reduzieren. Besteht hier keine Übereinstimmung in den beiden Urteilen, folgt die ausführliche Diskussion des strittigen Sachverhaltes unter Einbeziehung von Literatur und Ableiten verschiedener Beispiele. Erst wenn eine Einigung erzielt ist, wird das Prozedere

<sup>31</sup>Vgl. WIRTZ und CASPAR (2002).

fortgesetzt, wobei die Erfahrung zeigt, dass die Übereinstimmung der Urteile in diesem Schritt hoch ist. Bei der Einstufung der RD-Wirkungsweise wird ebenso verfahren, allerdings entstehen hier häufiger unterschiedliche Zuweisungen der RD-Wirkungsweisen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Wirkungsweisen nicht vollständig unabhängig voneinander sind. So ist *Unabhängigkeit* eine besondere Ausprägung der *Reduktion der Auswirkung von Unsicherheit* und *Eindeutigkeit* führt ebenfalls unter Umständen zu *Unabhängigkeit*. Bei der Einstufung wird dies berücksichtigt, indem jeweils *alle* passenden RD-Wirkungsweisen dokumentiert werden. Bei der Beherrschung von Unsicherheit aus zeitlich veränderlichen Einstufungen einzelner Beurteiler wird die hohe Redundanz der Hinweise in der Datenbank genutzt, um den Einfluss der Intrarater-Reliabilität zu verringern. Die Hinweise werden zunächst nur grob thematisch sortiert und nicht zusammengefasst, was dazu führt, dass Hinweise, die von unterschiedlichen Autoren aufgeführt werden, mehrfach vorhanden sind und entsprechend auch mehrfach eingestuft werden. Hierdurch treten beim finalen Zusammenfassen gleicher Hinweise Schwankungen bei der Einstufung zutage und können reflektiert werden.



## 6 RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen

Unter dem Begriff *Produktion* werden im Rahmen dieser Arbeit sowohl die *Fertigung* als auch die *Montage* von Einzelteilen, Baugruppen und Produkten verstanden. Die Potentiale von Konstruktionshinweisen zur Beherrschung von Unsicherheit in den Prozessen der Produktion werden im Folgenden am Beispiel von *Prinzipien* und ausgewählten *Richtlinien* aufgezeigt. Der Teil des *RopEx-Kataloges* mit Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der *Fertigung* mit Bezug zu verschiedenen Fertigungsverfahren findet sich in Anhang B. Gleiches gilt für Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in Zusammenhang mit der *Montage*.

### 6.1 Fertigungsprozesse

Fertigungsprozesse sind durch die Rolle des technischen Produktes als Operand, d.h. als passives Prozesselement gekennzeichnet. Der Zustand des Objektes *technisches Produkt* wird im Laufe der vernetzten Prozessschritte der Fertigung von der Einzelteilmontage, über die Nachbearbeitung ganzer Baugruppen bis hin zur Montage verändert. Fertigungsprozesse werden im *Modell technischer Systeme*, vgl. hierzu Kapitel 4.1, verortet. Die Gestaltung des technischen Produktes setzt in Bezug auf die verschiedenen Verfahren der Fertigung zwar ein Wissen der verfahrensrelevanten Prozessgrößen und der typischerweise eingesetzten Arbeitsmittel, bspw. Drehmaschine, voraus, im Fokus der Betrachtung in dieser Arbeit steht jedoch die Konstruktion des technischen Produktes, nicht der zugehörigen Arbeitsmittel. Die Beherrschung von Unsicherheit in den Prozessen der Fertigung wird entsprechend über die Produktgestalt bewirkt. Das Ziel hierbei ist eine möglichst geringe Schwankung in den Produkteigenschaften am Ende der Produktion. Im Folgende werden ausgewählte

- Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung,
- Bauweisen zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung,

- Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung,

vorgestellt. Besonders die Prinzipien und Bauweisen können ggf. auch zur Beherrschung von Unsicherheit in anderen Lebenslaufphasen beitragen.

### 6.1.1 Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung

#### Prinzip der Standardisierung

**Erläuterung** *Standardisierung* bedeutet eine Vereinheitlichung von Prozessen, oder Produkten.<sup>1</sup> Standardisierte Prozesse und Teile sind optimiert und haben sich häufig über längere Zeit bewährt. Standards erleichtern den Austausch von Gütern und den Vergleich von Produkten über Unternehmensgrenzen hinweg. Berechnungsnormen tragen bspw. direkt zur Beherrschung von Unsicherheit in der Produktentwicklung bei, da sie ein tragfähiges Berechnungsergebnis unabhängig von der Kompetenz des einzelnen Bearbeiters ermöglichen. Standardisierte Fertigungsprozesse bieten einen bewährten und häufig entsprechend dokumentierten Prozessablauf. Aus diesem Grund sind sie weniger fehleranfällig, während gleichzeitig die Wiederholbarkeit steigt. Das *Prinzip der Standardisierung* unterstützt die *Grundregel der Einfachheit*.<sup>2</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren ( $F$ ), Prozessvarianten reduzieren ( $Ei$ ).

#### Prinzip der Qualitätskontrolle

**Erläuterung** Die Qualitätskontrolle ist ein zusätzlicher Prozess mit dem Ziel Schwankungen zu identifizieren. Liegt bspw. ein Maß außerhalb des spezifizierten Bereiches, wird es als Schlechtteil qualifiziert und aussortiert, da das Ist-Maß zu einer unzulässigen Ausprägung in der Produktfunktion führen würde. Der zusätzliche Prozess ist selbst ebenfalls unsicherheitsbehaftet und erhöht durch den prozeduralen Charakter die Kosten. Grundsätzlich werden Qualitätskontrollen im gesamten Produktionsverlauf eingesetzt. Je früher ein Schlechtteil erkannt wird, desto weniger Folgekosten entstehen. Die Qualitätskontrolle setzt geeignete Messverfahren, aber auch eine entsprechende Gestaltung der Messstücke voraus, da das Messen relevanter Größen technisch möglich sein muss. Das Prinzip der Qualitätskontrolle wird durch zahlreiche Gestaltungsrichtlinien, bspw. aus dem Themenfeld *messgerecht*, unterstützt.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup>Vgl. DUDEN

<sup>2</sup>Vgl. SUH (1990), S. 52.

<sup>3</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 98-99.

**Wirkungsweise im RD** Schwankungsbreite beschränken ( $K$ )

**Beispiel** Medizintechnische Geräte unterliegen in Bezug auf die Qualität besonders strengen Anforderungen. Kosten werden gesenkt indem teure Komponenten erst zum Schluss montiert werden.<sup>4</sup>

### 6.1.2 Bauweisen zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung

**Prinzip der Funktionenintegration, Integralbauweise**

**Erläuterung** Bei der Integralbauweise werden verschiedene Bauteile zu einem zusammengefasst. Werden dabei mehrere Funktionen in ein physikalisches Teil integriert, spricht man von Funktionenintegration. Wichtig für die Vorhersagbarkeit des Systems ist die Unabhängigkeit der Teilfunktionen voneinander, indem pro Wirkfläche nur eine Funktion erfüllt wird. Liegt eine rein strukturelle Integration vor, ohne dass die Zuordnung der Funktionen geändert wird, spricht man von Strukturintegration.<sup>5</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren ( $F$ ), Unabhängigkeit ( $U$ ), Vorhersagbarkeit ( $V$ ). Die Wahrung der Eindeutigkeit ist jedoch sicherzustellen!

**Beispiel** Beispiele für Strukturintegration sind Leiterplatten oder die Fertigung von Gestell und Gehäuse in einem Stück.<sup>6</sup> In Abbildung 6.1 ist der Unterschied zwischen Differential- und Integralbauweise gut zu erkennen. Während für die linke Lösung elf Einzelteile benötigt werden, wird das Bauteil rechts als ein Teil gefertigt. Es entfallen möglicherweise unsicherheitsbehaftete Prozessschritte, und entsprechend die in der Folge mögliche Kumulation von Toleranzen über die Fügstellen. Zusätzlich wird der Informationsgehalt u.U. reduziert.<sup>7</sup>

**Prinzip der Funktionentrennung, Differentialbauweise**

**Erläuterung** Bei der Funktionentrennung oder Aufgabenteilung<sup>9</sup> wird jeder Funktion ein Funktionsträger zugeordnet. Dabei findet eine physische Trennung der Teilstrukturen statt.

---

<sup>4</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 98.

<sup>5</sup>Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 499-502; vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 159-163; vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 130; vgl. SUH (1990), S. 52

<sup>6</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 130.

<sup>7</sup>Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 500.

<sup>8</sup>Quelle: EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 500.

<sup>9</sup>Vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 553-561.

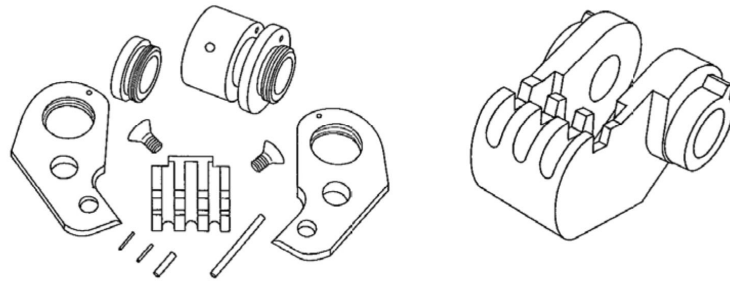


Abbildung 6.1: Differential- versus Integralbauweise.<sup>8</sup>

Es wird zwischen Aufgabenteilung bei gleicher und unterschiedlicher Funktion unterschieden. Bei Aufgabenteilung bei unterschiedlicher Funktion wird jede Funktion nur einmal realisiert. Im Gegensatz dazu wird bei der Aufgabenteilung bei gleicher Funktion eine Funktion mehreren getrennten Teilen zugewiesen. Es entsteht also ein redundantes System.<sup>10</sup>

**Wirkungsweise im RD** Unabhängigkeit der Funktionen durch Entkoppeln (U).

**Beispiel** In der Messtechnik wird empfohlen Messschleifen für genaue Messergebnisse von der Tragstruktur getrennt und mit einer eigens dafür geschaffenen Teilstruktur zu realisieren. Schwankungen, wie Verformung durch Belastung, haben so keinen Einfluss auf das Messergebnis.<sup>11</sup> In Abbildung 6.2 ist eine konkrete Lösungsmöglichkeit zur Trennung von Kraftaufnahme und Drehachse dargestellt. Die Verformung durch die aufgenommene Kraft hat keine Auswirkung mehr.<sup>12</sup>

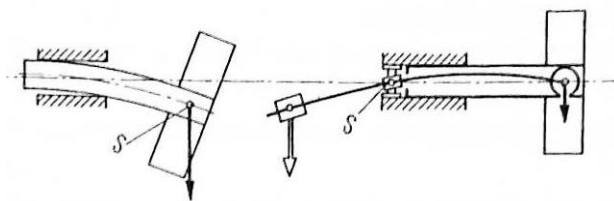


Abbildung 6.2: Funktionentrennung an einer Lagerung.<sup>13</sup>

<sup>10</sup> Vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 553-561; vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 131-132; vgl. FRENCH (1992a), S. 221; vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 495-498.

<sup>11</sup> Vgl. HALE (1999), S. 48.

<sup>12</sup> Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 131-132.

<sup>13</sup> Quelle: KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 132.

### 6.1.3 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung

**Fertigungsgerechtes Gestalten** Die im *RopEx-Katalog* berücksichtigten Fertigungsverfahren sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Es werden *zerspanende Verfahren*, *urformende Verfahren*, *umformende Verfahren* und Verfahren zum *Fügen* berücksichtigt. Die Richtlinien befinden sich in tabellarischer Form in Anhang B.1.1.

Tabelle 6.1: Berücksichtigte Fertigungsverfahren.

| Zerspanen                                  | Umformen                                | Urformen                                   | Fügen   |
|--|---|--|---|
| <i>Allgemeine Hinweise,</i><br>Tabelle B.1 | <i>Gesenkschmieden,</i><br>Tabelle B.6  | <i>Gießen,</i><br>Tabelle B.9              | <i>Fügen allgemein,</i><br>Tabelle B.13           |
| <i>Bohren,</i><br>Tabelle B.2              | <i>Kaltfließpressen,</i><br>Tabelle B.7 | <i>Spritzgießen,</i><br>Tabelle B.10       | <i>Widerstandspunktschweißen,</i><br>Tabelle B.14 |
| <i>Fräsen,</i><br>Tabelle B.3              | <i>Biegen,</i><br>Tabelle B.8           | <i>Additive Fertigung,</i><br>Tabelle B.11 | <i>Laserschweißen,</i><br>Tabelle B.14            |
| <i>Schleifen,</i><br>Tabelle B.4           |   |  | <i>Schweißen allgemein,</i><br>Tabelle B.14       |
| <i>Drehen,</i><br>Tabelle B.5              |   |  | <i>Schrauben,</i><br>Tabelle B.15                 |
| <i>Stanzen/Schneiden,</i><br>Tabelle B.8   |   |  |   |

**Erläuterung** Die Richtlinien aus diesem Themenfeld berücksichtigen die Besonderheiten der einzelnen Fertigungsverfahren und ermöglichen so eine kostengünstige, schnelle und qualitativ hochwertige Fertigung. Unterstützt werden Ziele wie allgemeine Herstellbarkeit, eine Reduzierung des Aufwandes, beanspruchungsgerechte Gestaltung, Standardisierung, Reduzierung des Ausschusses und viele mehr. Das übergeordnete Potential der robustheitsfördernden Hinweise besteht in der Verringerung der Schwankungen in den Eigenschaften des Produktes. Da sehr viele Autoren zu diesem Themenfeld beitragen, wird an dieser Stelle auf eine Nennung aller identifizierten Autoren verzichtet. Stattdessen werden die Autoren, jeweils an geeigneter Stelle, zusammen mit den Konstruktionshinweisen genannt.

**Wirkungsweise im RD** Schwankungen in den Eigenschaften des technischen Produktes werden durch sehr viele verschiedene RD-Wirkungsweisen reduziert, die jeweils zu-

sammen mit der Nennung der Hinweise dokumentiert sind. Insgesamt treten im Rahmen der Fertigung vor allem die RD-Wirkungsweisen *Reduzieren der Fehlermöglichkeiten (F)*, *höhere Einfachheit der Prozesse (Ei)*, *höhere Qualität* durch Beachtung verfahrensbedingter Besonderheiten (Q) Verwendung.

Tabelle 6.2: Hinweise zum allgemeinen *fertigungsgerechten Gestalten*

Quellen: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 219; HOENOW und MEISSNER (2016), S. 90-92; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 193-194; MCADAMS (2003), S. 364; STOLL (1986) zit. nach SUH (1990), S. 41; SWIFT und BOOKER (2003), S. 9; ULRICH und EPPINGER (2008), S. 221-222

| Ziel  | Gestaltungshinweis   |
|-------|--|
| F, Ei | Einfache Herstellung anstreben   |
| F, Ei | Stufenarmen Fertigungsprozess anstreben  |
| F, S  | Teile mit wenigen Bearbeitungsflächen, die möglichst auf gleicher Höhe, und gleichartig sind, anstreben  |
| K     | Messbare Bemaßung anstreben  |
| F, Ei | Wenig Einzelteile/Varianten anstreben  |
| Ei    | Komponenten und Prozesse standardisieren   |
| Ei    | Normteile verwenden  |
| Z, Ei | Modulare Struktur anstreben  |
| Z     | Komponenten für verschiedene Zwecke gestalten  |
| F, Ei | Sekundärprozesse vermeiden   |
| S     | Differenzen von fertigbaren Toleranzen in Versuchswerkstatt und unter realen Fertigungsbedingungen beachten, Versuchswerkstatt arbeitet meist präziser |

Grundsätzlich sollten Bauteile so gestaltet werden, dass eine einfache Fertigung möglich ist. Einfache Prozesse sind wenig komplex und im Allgemeinen gut beherrschbar. Wann ein Fertigungsprozess als einfach gelten kann ist im Wesentlichen von der Charakteristik der einzelnen Produktion abhängig. Beispielsweise spielen hier Erfahrung und Kompetenz eine große Rolle.

Im Sinne des Unsicherheitsbewusstseins sollten Fertigungsprozesse stufenarm, d.h. aus möglichst wenig Teilprozessen, aufgebaut sein, da diese die Wahrscheinlichkeit für Schwankungen im Allgemeinen erhöhen. Bauteile sollten in Bezug auf die Anzahl der zu bearbeitenden Flächen, durch den Zusammenhang zwischen Flächen und Bearbeitungsschritten, so gestaltet sein, dass möglichst wenig Flächen bearbeitet werden müssen.

In Bezug auf die relative Lage der Bearbeitungsflächen sollte angestrebt werden diese auf möglichst wenige gemeinsame Ebenen zu legen. Dies minimiert relative Lageabweichungen der Flächen zueinander. Die Unsicherheit aus zusätzlichen Prozessen, wie bspw. das Umspannen des Bauteils, entfallen hierbei.

Bauteile sollten so gestaltet sein, dass relevante Maße auch mit den im Unternehmen verfügbaren Mitteln kontrolliert werden können. Dies ist stark von den jeweiligen

verfügbaren Messverfahren abhängig.

Je weniger Einzelteile gefertigt werden müssen, desto weniger tolerierte Bearbeitungsflächen entstehen. Gleichzeitig sollte die Anzahl der Varianten für einzelne Bauteile minimiert werden, auf diese Weise wird Verwechslungen vorgebeugt, der Informationsgehalt wird reduziert und die spezifische Kompetenz zur Herstellung steigt durch den erhöhten Standardisierungsgrad schnell an. Wenn möglich sollten Normteile verwendet werden. Diese besitzen vorhersagbare Eigenschaften und ebenfalls einen hohen Standardisierungsgrad.

Auch das Streben nach einer modular aufgebauten Struktur dient der Verringerung der inneren Komplexität über die geringere Anzahl von Varianten innerhalb des Unternehmens. Abgesehen von den bereits erläuterten Vorteilen der Standardisierung, sind modular aufgebaute Systeme an Veränderungen anpassbar. Ist beispielsweise in der Fertigung ein neuartiges Verfahren verfügbar, ist es u.U. möglich ein Modul entsprechend zu verändern, ohne dass die Fertigung der restlichen Bauteile oder Baugruppen betroffen ist. Die Gestaltung von Komponenten für verschiedene Zwecke ist analog zur Verwendung von Standardkomponenten zu betrachten.

Sekundärprozesse sind als zusätzliche Prozesse unsicherheitsbehaftet. Sie erhöhen die Wahrscheinlichkeit für Fehler, bspw. durch den Menschen, und sind daher zu vermeiden.

Bei der Festlegung der Bauteiltoleranzen sollte darauf geachtet werden die in der Serienfertigung möglichen Ausprägungen zu berücksichtigen, da die Prozessfähigkeit der Serienfertigung oft geringer als die der Prototypenfertigung ist.

**Toleranzgerechtes Gestalten** Tabelle 6.3 zeigt einen Überblick der unter dem Stichwort *toleranzgerecht* als robustheitsförderlich eingestuften Richtlinien. Die Reduktion von an der Funktionserfüllung einer Konstruktion beteiligten Bauteilmaße führt zu einer Verringerung der Unsicherheit, da weniger schwankende Produkteigenschaften zur Funktion beitragen. Toleranzen sind hierbei Ausdruck dieser Unsicherheit.

Je komplexer ein Körper gestaltet ist, desto schwieriger ist er zu fertigen und auch zu vermessen. Die Wahl einfacher Geometrien verringert die Wahrscheinlichkeit, dass Schwankungen, sowohl durch Fertigungsprozesse, bspw. durch gekoppelte Koordinatenrichtungen bei der Erzeugung einer schrägen Fläche, als auch durch die höhere Komplexität der Messung, bspw. durch eine erhöhte Anzahl von Messpunkten, größer ausfallen als nötig.

Bearbeitungslängen sind nicht nur in Bezug zu Kosten möglichst gering zu halten. Bei großen Bearbeitungslängen kann es zu Abweichungen bspw. der Formtoleranzen kommen, da durch Veränderungen des Abstandes zur Einspannung und die damit verbundene veränderte Steifigkeit bei gleicher Schnittkraft größere elastische Verformungen des Werkstückes auftreten können. Die Bearbeitungslänge sollte entsprechend so lang wie nötig, aber so kurz wie möglich realisiert werden.

Doppelpassungen führen zu uneindeutigem Verhalten von Bauteilpaarungen. Die exakte Aufteilung von Kräften an Lagerungen, aber auch die exakte Position von Bauteilen

zueinander kann dann nicht mehr eindeutig vorhergesagt werden. Dies kann unter Umständen massive Auswirkungen auf Lebensdauern bzw. die Anzahl an Schlechtteilen führen. Manchmal lassen sich Doppelpassungen jedoch nicht vermeiden. In diesem Fall können bspw. enge Toleranzen (zu Lasten der Kosten in der Fertigung), oder das Prinzip der Elastizität die Auswirkungen der Unsicherheit verringern.

Der gezielte Einsatz von elastischen Elementen kann dazu führen, das trotz vorhandener Toleranzen kein Spiel entsteht und somit kein plötzliches Verändern der Wirkflächenpaare auftreten kann, was die Vorhersagbarkeit des Verhalten erhöht. Hierdurch werden die Auswirkungen der Unsicherheit reduziert.

Justierungsmöglichkeiten erlauben den Umgang mit einer spezifischen in der Bauteilpaarung vorhandenen Unsicherheit. Dieser, selbst unsicherheitsbehaftete, Prozess ist häufig gegenüber der reinen Eliminierung der Störgröße *Eigenschaftsschwankung* vorzuziehen.

Bei Getrieben kann eine flache Übertragungsfunktion erreicht werden, indem im Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eine Verkleinerung angestrebt wird. Fehler aus der Fertigung oder Montage werden somit ebenfalls absolut gesehen kleiner.

Bei hohen Anforderungen an die relative Lage von Bauteilen kann Unsicherheit vermieden werden, indem Flächen in einem Arbeitsgang hergestellt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Anbringen von Bohrungen für Passstifte in einer Aufspannung.

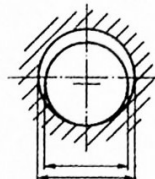
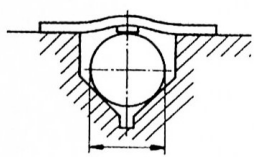
Toleranzketten in Bauteilmaßen können vermieden werden, indem die Maße jeweils in Bezug auf einen Referenzpunkt und nicht in Bezug zur vorher bearbeiteten Fläche angefahren werden. Dies reduziert die Auswirkung von Unsicherheit in den einzelnen Bearbeitungsvorgängen relativ zu den anderen. Idealerweise sind die angefahrenen Koordinaten unabhängig voneinander.

Etwaige entstehende Toleranzketten können bei hohen Anforderungen an die Präzision mit Hilfe von Rasteinrichtungen gewährleistet werden. Diese Kompensation reduziert die Auswirkung der Unsicherheit der einzelnen Objekteigenschaften.

Die Funktion kann durch geschickte Anordnung der Bauteile unabhängiger von in der Fertigung unvermeidbaren Toleranzen einzelner Bauteile realisiert werden.

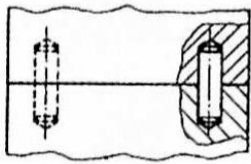
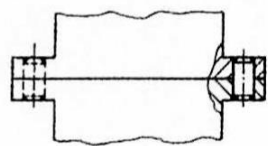
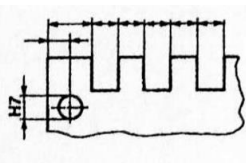
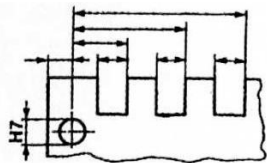
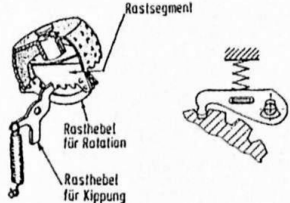
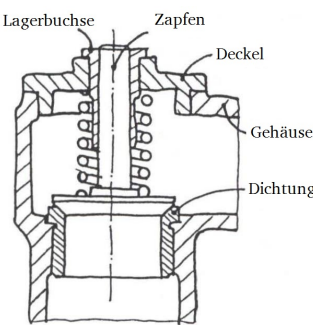
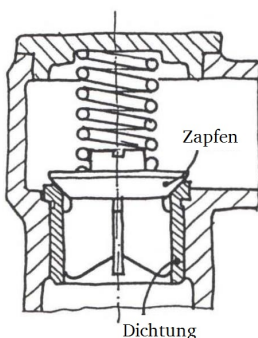
Tabelle 6.3: Hinweise zum *toleranzgerechten Gestalten*

Quelle: KOLLER (1998), S. 254-259; HESSE (1994), S. 23; MATTHIASSEN (1997), S. 151-153; MCADAMS (2003), S. 361

| Ziel  | Gestaltungshinweis                       | ungünstig   | besser  |
|-------|--|---|---|
| F, Ei | Zahl der Bauteile/Bauteilmaße reduzieren |  |  |



|       |   |  |  |
|-------|---|--|--|
| F, Ei | Einfach herstellbare und messbare Teilegestalt und Flächenformen bevorzugen   |  |  |
| E,A   | Kleine Absolutmaße anstreben, Abstände von Wirkflächen möglichst klein halten   |  |  |
| V, B  | Unnötig enge Toleranzen und Doppelpassungen vermeiden   |  |  |
| A     | Spielfreie Gelenke, Führungen, Gewinde und Steckverbindungen lassen sich mittels elastischer Elemente kostengünstig realisieren                                     |  |  |
| Z     | Spielfreie Gelenke, Führungen, Gewinde etc. lassen sich mit Justierelementen kostengünstiger realisieren als ohne diese Elemente                                    |  |  |
| A     | Größe präziser Flächen nach Möglichkeit klein halten  |  |  |
| A     | Bei Getrieben für präzise Weg- oder Winkelübertragung Vergrößerungen der Eingangsgrößen vermeiden, da sonst Fehler mit vergrößert werden, Verkleinerungen anstreben |  |  |

|      |  |  |   |
|------|--|--|---|
| S, F | Wirkflächen, die zentrisch, parallel oder fluchtend zueinander sein müssen so gestalten, dass diese in einem Arbeitsgang hergestellt werden können |    |    |
| U, A | Langgliedrige Toleranzketten vermeiden   |    |    |
| U    | Toleranzketten mittels Rasteinrichtungen kompensieren  |  |    |
| U    | Aufaddieren von Toleranzen vermeiden, indem eine minimale Anzahl an Teilen die Abweichung der kritischen Bedingung beeinflusst                     |  |  |

**Messgerechte und prüfgerechte Gestaltung** Tabelle 6.4 zeigt die als robustheitsförderlich eingestuftten Konstruktionshinweise zum Thema *mess- und prüfgerechte* Konstruktion.

Die Verwendung von Normmaßen und Normtoleranzen reduziert im Sinne der Standardisierung die Komplexität, den Informationsgehalt von Bauteilinformationen und somit auch die Unsicherheit. Unternehmensübergreifend kann auf durchgängige Bezeichnungen zurückgegriffen werden. Außerdem können entsprechend normierte Werkzeuge, wie bspw. Reibahlen, verwendet werden.

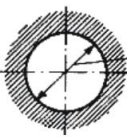
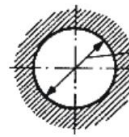
Die Verwendung von automatisierten Prüfverfahren für möglichst viele Bauteile erhöht ebenfalls die Standardisierung und verringert gleichzeitig die Fehlerwahrscheinlichkeit durch Bedienfehler.

Die Gestaltung abgeschlossener funktionaler Gruppen reduziert nicht nur die Abhän-

gigkeit im Sinne des Entkoppelns, sondern erhöht die frühe Entdeckung von Fehlern bzw. unzulässigen Schwankungen. Zusätzlich fällt die Identifikation des Grundes für Fehler leichter in weniger komplexen Baugruppen.

Tabelle 6.4: Hinweise zur *mess- und prüfgerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 293; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 120, 193

| Ziel  | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|-------|--|---|---|
| Ei, F | Normmaße und -toleranzen vorsehen  |  |  |
| Ei, F | Automatisiertes Prüfen ermöglichen, standardisierte Prüfvorgänge vorsehen                              |   |   |
| U     | In sich abgeschlossene Funktionsgruppen gestalten, um Ausfälle getrennt prüfen und ausmerzen zu können |   |   |

## 6.2 Montageprozesse

Auch während der Montage ist das technische Produkt innerhalb des Modells technischer Systeme als Operand zu verstehen. Es erfährt beim Durchlaufen der Montageprozessketten Zustandsänderungen, d.h. seine Eigenschaften werden schrittweise verändert. Am Ende der Montage steht das fertige Produkt.<sup>14</sup>

### 6.2.1 Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage

#### Prinzip der Symmetrie

**Erläuterung** Das Prinzip der Symmetrie fordert eine symmetrische Gestalt von Bauteilen oder deren Anordnung zueinander. Es kann sich jedoch ebenso auf symmetrische Belastung, Ausdehnung oder ähnliches beziehen. Das Prinzip der Symmetrie liegt insgesamt einer Vielzahl von Richtlinien zu Grunde. Symmetrische Teile sind unter anderem

<sup>14</sup>Die Montage muss nicht immer vollständig beim Hersteller erfolgen. Häufig werden technische Produkte erst beim Endkunden montiert und in Betrieb genommen. Andere Varianten stellen bspw. die vollständige oder teilweise Verlagerung der Montagetätigkeiten auf den Kunden (bspw. umgesetzt von *IKEA*) dar. Der hier verwendete Begriff ist diesbezüglich nicht festgelegt. Als Charakteristikum dient ausschließlich die passive Rolle als Operand des technischen Produktes.

einfacher messbar, häufig genauer fertigbar, verwechslungsfrei zu montieren oder unterstützen eine ausdehnungsgerechte Gestaltung.<sup>15</sup>

**Wirkungsweise im RD** Das Prinzip der Symmetrie kann vielen Prozessen des Produktlebenslaufes zugeordnet werden. In der Montage werden vor allem Fehlermöglichkeiten reduziert, da gerade unter Beteiligung des Menschen häufig Fehler durch Verwechslung entstehen ( $F$ ). Zusätzlich kann das Prinzip der Symmetrie bspw. in der Nutzung die Wirkung von Nebengrößen im System eindämmen und damit die Auswirkung einer Schwankung eliminieren ( $A, U, S$ ), vgl. Abbildung 6.3.

**Beispiel** Abbildung 6.3 zeigt am Beispiel einer Schrägverzahnung wie durch eine symmetrische Anordnung der Wirkkörper die Störgröße *Axialkraft* im System eingedämmt wird. Die Lagerung liegt nicht im Kraftfluss der durch die Schrägverzahnung entstehenden Axialkräfte.

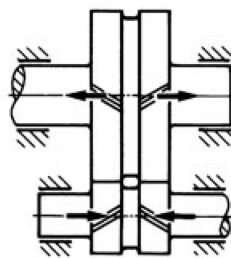


Abbildung 6.3: Spiegelsymmetrische Ausführung einer Schrägverzahnung. Die im Betrieb entstehenden Axialkräfte müssen nicht von der Lagerung aufgenommen werden. Der Axialkraftfluss ist in sich geschlossen und belastet nur einen sehr geringen Teil des Systems.<sup>16</sup>

### Prinzip des Sortierens und Zuordnens

**Erläuterung** Das Prinzip des Sortierens und Zuordnens sieht einen zusätzlichen Prozessschritt vor dem eigentlichen Fügen bzw. Montieren vor. Die Einzelteile werden einzeln vermessen und identifizierbar gespeichert. Bei der Montage werden dann die im Rahmen der geforderten Passungen am besten geeigneten Bauteile miteinander gefügt. Die Fertigungstoleranzen haben auf diese Weise keinen bzw. einen geringeren Einfluss auf die Funktionserfüllung.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 550; vgl. HALE (1999), S. 47; vgl. SUH (1990), S. 52

<sup>16</sup>Quelle: FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 550

<sup>17</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 95.

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Schwankung reduzieren ( $A$ ), bestenfalls Unabhängigkeit der Funktion von Toleranzen ( $U$ ).

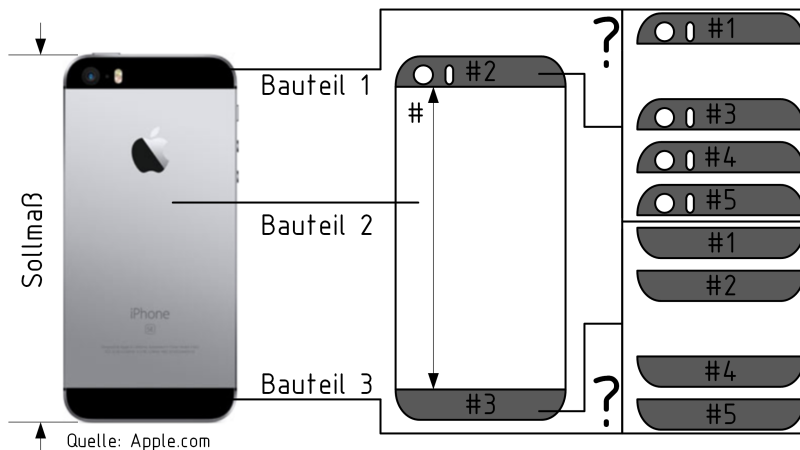


Abbildung 6.4: Montage des iPhone 5, 5s und SE. Bauteil 2 wird vermessen und dann die Bauteile 1 und 2 entsprechend den Forderungen an das Sollmaß passend dazu ausgewählt.<sup>18</sup>

**Beispiel** Die Rückseite des *iPhone 5* wird aus drei Teilen gefügt. Der Spalt zwischen Mittel- und Außenteilen muss dabei sehr klein bleiben. Um diese Anforderung zu erfüllen wird das mittlere Teil gescannt und die Maße mit denen von vorhandenen Außenteilen in einer Datenbank verglichen. Teile, deren addierte Abweichung in der geforderten Toleranz bleiben, werden ausgewählt und zusammen montiert, vgl. Abbildung 6.4.

### Prinzip der Fehlerjustierung

**Erläuterung** Fehlerjustierung bezeichnet einen zusätzlichen Prozess der sowohl einmalig (bspw. während der Montage), als auch mehrfach (bspw. zur Anpassung an veränderte Nutzungsrandbedingungen) zum Erreichen des Sollwertes ausgeführt werden kann. Dem Prinzip der Fehlerjustierung kann eine Vielzahl von Richtlinien zugeordnet werden, sie sind Gegenstand der Diskussion in Kapitel B.2.1.

**Wirkungsweise im RD** Schwankungen in der Funktion verhindern/verringern durch Einstellen ( $Z$ ). Schwankende Objekteigenschaften haben in der Folge eine geringere, im besten Fall keine, Auswirkung auf die Funktion des technischen Produktes ( $A$ ,  $U$ ).<sup>19</sup>

<sup>18</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach EBRO und HOWARD (2016), S. 95.

<sup>19</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 149-156; vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 97; vgl. MCADAMS (2003), S. 360; vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 153-156.

**Beispiel** Die in Abbildung 6.5 dargestellte Linearführung ist statisch überbestimmt gelagert. Beide Schienen legen die Position des Schlittens fest, damit führen Schwankungen in Folge von Fertigungsprozessen zu Zwangskräften im System. Damit die Führung funktioniert, müssen alle Bauteile im linken Lösungsvorschlag mit sehr engen Fertigungs- und Montagetoleranzen produziert werden, entspricht RD-Wirkungsweise *S*. Im Lösungsvorschlag rechts lässt sich die Position einer Führungsschiene relativ zur anderen einstellen. Die Position der zweiten Schiene wird während der Montage ganz zum Schluss festgelegt. Toleranzen haben damit, solange sie über der Schienenlänge konstant sind, keinen Einfluss mehr auf die zur Verschiebung benötigte Kraft. Ändern sich Eigenschaften während der Nutzung, bspw. durch unterschiedliche Erwärmung, muss die Linearführung erneut eingestellt werden.

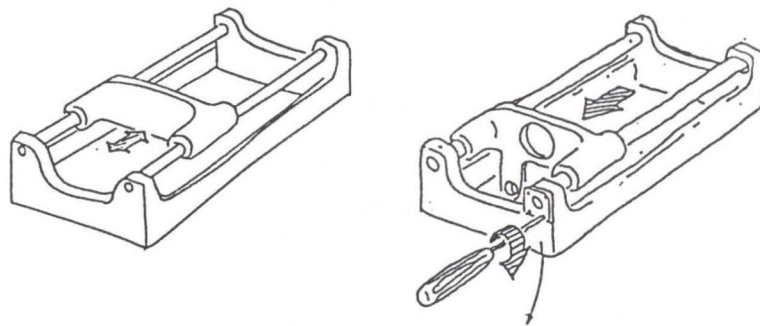


Abbildung 6.5: Linearführung, links: statisch überbestimmt, rechts: statisch überbestimmt und justierbar.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup>Quelle: MATTHIASSEN (1997), S. 155.

## 7 RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen

Unsicherheit aus den Lebenslaufphasen *Werkstoffherstellung, Fertigung, Montage* kumuliert in den Eigenschaften des Arbeitsmittels. Damit ist die Funktion des Produkts per se Schwankungen unterworfen, was zu Schwankungen in den intendierten Endzuständen der Produktnutzung führt. Zusätzlich ist das technische System während der Nutzung einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt, die in Art, Anzahl und Ausprägung sehr unterschiedlich und schwer antizipierbar sein können. Diese Unsicherheit in prozessbeschreibenden Parametern wirkt sich bspw. in Form von Störgrößen auf das Endergebnis des Nutzungsprozesses aus. Zusätzlich zur gewollten Zustandsänderung finden während der Nutzung parallele Prozesse statt, die meist zu einer ungewollten Zustandsänderung des Arbeitsmittels führen. Diese ungewollten Prozesse können unter Umständen mit der intendierten Zustandsänderung wechselwirken. Zur Gliederung der zur Unterstützung der Nutzungsphase verwendbaren Konstruktionshinweise wird das *MTS* verwendet, vgl. Abbildung 7.1.

Die technische *Funktion* bildet den kausalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen ab und stellt die Ausgangsgröße als Wirkgröße zur Verfügung. Für den Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen sind die Objekteigenschaften des technischen Produktes verantwortlich. Konstruktionshinweise, die diesem Bereich zugeordnet sind, tragen bspw. dazu bei, dass durch Eindeutigkeit überhaupt ein Zusammenhang zwischen den Größen beschrieben werden kann, oder reduzieren die zur Funktionserfüllung benötigten Eigenschaften in Bezug auf Anzahl und Ausprägung der Unsicherheit.

*Störgrößen* sind, bezogen auf die Vielfältigkeit möglicher Einflüsse, ein weites Feld und für die Entwicklung robuster Systeme von zentralem Interesse. Entsprechend sind der Kategorie Störgrößen alle Hinweise zugeordnet, die sich mit ihrer Beherrschung befassen. Dies kann bspw. durch Abschirmung oder durch die Wahl eines von der Störgröße unabhängigen physikalischen Effektes erreicht werden. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt der *Mensch* und seine Rolle unter Unsicherheit thematisiert. Obgleich der Mensch selbst nicht im Zentrum dieser Arbeit steht, muss doch das technische System in der Interak-

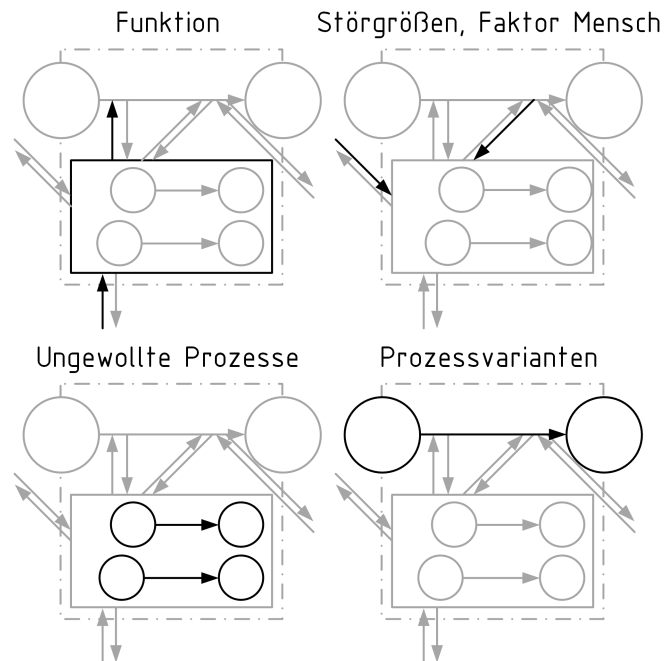


Abbildung 7.1: MTS als Ordnungsschema für die thematische Gliederung der Konstruktionshinweise im Kontext von Nutzungsprozessen.

tion mit dem Menschen so gestaltet sein, dass Schwankungen im Endergebnis möglichst klein ausfallen.

*Ungewollte Prozesse* wie Alterung und Verschleiß verändern das technische Produkt unter Umständen derart, dass die Funktionserfüllung nicht mehr gewährleistet ist. Daher sind in diesem Abschnitt Hinweise zusammengefasst, die den Umgang mit solchen Prozessen behandeln. Beispielsweise kann eine sinnvolle Gestaltung dazu führen, dass korrosive Medien sich nicht im Produkt sammeln können. Verschleiß, so er nicht verhindert werden kann, kann bspw. durch austauschbare Verschleißteile beherrscht werden.

*Prozessvarianten* befassen sich mit der gewollten Veränderung von Nutzungsprozessen über einen längeren Zeitraum. Das technische Produkt kann nun entweder alle Funktionen und Ressourcen für alle Zeiten beinhalten, oder es ist bspw. durch einen modularen Aufbau an veränderte Erfordernisse anpassbar. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Hinweise befassen sich vor allem mit der Adaption des technischen Systems.

Aus Platzgründen werden an dieser Stelle nur Konstruktionshinweise der Kategorien *Funktionserfüllung unter Unsicherheit* und *Umgang mit Störgrößen*, jeweils auf den Ebenen *Grundregeln* und *Prinzipien*, vorgestellt. Im Anhang C finden sich ergänzend hierzu:

- *Richtlinien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit*,  
(vgl. Abschnitt C.1.1)



- *Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen,*  
(vgl. Abschnitt C.2.1)
- *Prinzipien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen,*  
(vgl. Abschnitt C.3.1)
- *Richtlinien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen,*  
(vgl. Abschnitt C.3.2)
- *Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit durch ungewollte Prozesse,*  
(vgl. Abschnitt C.4)
- *Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in Prozessvarianten,*  
(vgl. Abschnitt C.5.1)
- *Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in Prozessvarianten,*  
(vgl. Abschnitt C.5.1).

## 7.1 Funktionaler Zusammenhang

### 7.1.1 Grundregeln zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit

#### Eindeutigkeit

**Erläuterung** Die *Grundregel der Eindeutigkeit*, im Englischen *clarity*, findet sich vielfach in der konstruktionswissenschaftlichen Literatur wieder. Auch im RD spielt Eindeutigkeit eine große Rolle. Sie fordert den eindeutigen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Damit ist Eindeutigkeit die Voraussetzung zur Einleitung von RD-Maßnahmen bzw. deren Bewertung. Es existieren viele Konstruktionshinweise die sich mit Eindeutigkeit befassen, bspw. Doppelpassungen vermeiden. Für diese Arbeit ist Eindeutigkeit in Bezug auf die Thematik der Kraftleitung von besonderem Interesse. Ob Eindeutigkeit vorliegt oder nicht hängt auch von der Granularität des Produktmodells ab. Auf Mikroebene sind Flächenberührungen uneindeutig. Deshalb sollten Linien- bzw. Punktberührungen angestrebt werden, sofern dadurch Forderungen nach der Steifigkeit nicht verletzt werden bzw. die Bauteilfestigkeit überschritten wird.<sup>1</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit des Verhaltens ( $V$ )

**Beispiel** Abbildung 4.19 auf S.76 exemplifiziert das Thema Eindeutigkeit am Beispiel einer Lagerung.

---

<sup>1</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 494-500; vgl. FRENCH (1994), S. 229,233; vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 505.

## Einfachheit und Informationsaxiom

**Erläuterung** Die beiden Gestaltungshinweise *Einfach* und *Informationsaxiom* sind einander sehr ähnlich, stehen sie doch beide in Zusammenhang mit der Reduktion von Komplexität. Steigende Komplexität führt durch mehr Systemelemente (Art und Anzahl), mehr Verknüpfungen (Art und Anzahl) zwischen diesen und mehr möglichen Zuständen aller Elemente zu mehr Unsicherheit im System. Während Einfachheit nach einer möglichst geringen Anzahl an Bauteilen, Funktionen oder Prozessschritten strebt, zielt das Informationsaxiom auf den minimalen Gesamtinformationsgehalt einer Konstruktion ab. Dies bezieht sich auf Informationen zur Bauteilgestalt, wie auf Know-How zur Fertigung oder Berechnung. Daher bieten Konstruktionen die diesen Grundregeln genügen nicht nur wirtschaftliche Vorteile (vor allem durch kurze Prozesszeiten), sondern mindern auch die Unsicherheit im System. Besonders in den Fertigungs- und Montage-richtlinien gibt es viele Hinweise, die die Anzahl oder Komplexität einzelner Teilprozesse verringern und/oder die Standardisierung fördern.<sup>2</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren (*F*), Einfachheit erhöhen (*Ei*)

**Beispiel** Abbildung 7.2 zeigt zwei verschiedene Lösungsvorschläge für eine Mischbatterie mit jeweils einer translatorischen und einer rotatorischen Einstellmöglichkeit. Lösungsvorschlag a besteht im Vergleich der Lösungen zueinander aus mehr Einzelteilen und ist daher aufwändiger zu fertigen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit für Fehler während der Produktion. Zusätzlich ist die Wartung in der Nutzung komplexer, die Anfälligkeit gegenüber Schmutz und Korrosion höher. Lösungsvorschlag b erfüllt die Grundregel der Einfachheit, da die Komplexität im Vergleich geringer ausfällt. Dies gilt auch für den Informationsgehalt der Lösung, da weniger Bauteile und Prozesse beschrieben werden müssen.<sup>3</sup>

## Unabhängigkeitsaxiom

**Erläuterung** Das *Unabhängigkeitsaxiom* ist eines der zwei Axiome von Suh<sup>5</sup> und ist im RD gemeinhin als gewinnbringend akzeptiert. Es fordert die Unabhängigkeit verschiedener Teilfunktionen mit dem Ziel die Komplexität durch Wechselwirkungen im System zu minimieren. Eine Schwankung in einer teilfunktionsrelevanten Eigenschaft hat in der Folge keine Auswirkungen auf andere Teilfunktionen.<sup>6</sup>

---

<sup>2</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 501-504; vgl. SUH (1990), S. 47-48, 64.

<sup>3</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 503-504.

<sup>4</sup>Quelle: FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 503 und S.504.

<sup>5</sup>Vgl. SUH (1990), S. 47.

<sup>6</sup> Vgl. SUH (1990), S. 47-48.

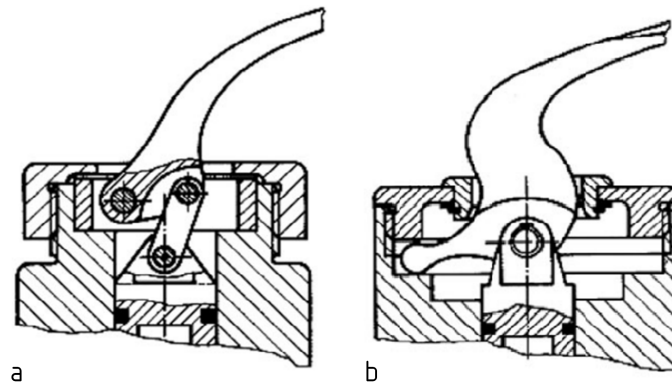


Abbildung 7.2: Zwei Lösungsvarianten einer Mischbatterie. Die rechte Lösung ist einfacher durch weniger Bauteile und weniger Prozesse. Durch die geringere Komplexität ist auch die Unsicherheit geringer.<sup>4</sup>

### Wirkungsweise im RD Unabhängigkeit ( $U$ )

**Beispiel** Abbildung 7.3 zeigt verschiedene Möglichkeiten einer Welle-Nabe-Verbindung, wobei jeweils die Teilfunktionen *axial Positionieren*, *Zentrieren* und *Drehmoment übertragen* realisiert werden. In Lösung *a* sind das reibkraftschlüssig übertragbare Moment und die axiale Position des Ritzels beide von der Position der Mutter abhängig und nicht getrennt voneinander einstellbar. In Lösung *b* ist die axiale Position des Ritzels nicht mehr mit dem übertragbaren Moment gekoppelt, die Vorspannung der Mutter hat jedoch nach wie vor einen Einfluss auf den Anteil des Drehmomentes der, zusätzlich zur Passfeder, über die Stirnseiten des Ritzels im Nebenkraftschluss übertragen werden kann. In *c* wird die axiale Positionierung von Wellenbund und Sicherungsring übernommen ohne Vorspannkräfte aufzubringen. Das Drehmoment wird nur von der Passfeder übertragen, während die Zylindermantelflächen die Zentrierung sicherstellen. Lösung *c* ist also in Bezug auf die Unabhängigkeit der Teilfunktionen die beste, Schwankungen in den jeweiligen teilfunktionsrelevanten Eigenschaften wirken sich nicht auf die anderen Teilfunktionen aus.<sup>7</sup>

### 7.1.2 Prinzipien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit

Der vorliegende Abschnitt behandelt diejenigen Prinzipien, die im Rahmen des RD zur Unterstützung der Funktionserfüllung eingesetzt werden können. Die große Anzahl macht eine weitere thematische Gliederung notwendig. Daher sind die Prinzipien wie folgt geordnet:

<sup>7</sup>Vgl. STEINHILPER und SAUER (2012), S. 175.

<sup>8</sup>Quelle: STEINHILPER und SAUER (2012), S. 175.

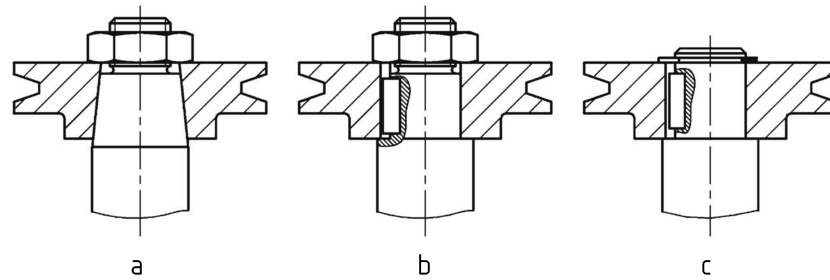


Abbildung 7.3: Unabhängigkeit am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung.<sup>8</sup>

- **Streben nach Eindeutigkeit**  
*Kinematic Design* (S. 122), *Exact Constraint Design* (S. 123), *Definierte Kraftver-zweigung* (S. 124), *Stabilität* (S. 125), *Bistabilität* (S. 125)
- **Konstruieren mit Uneindeutigkeit**  
*Spiel* (S. 127), *Enge Toleranzen* (S. 127), *Selbstpositionierung* (S. 128)
- **Auswirkung von Schwankungen verringern**  
*Prinzip der Elastizität* (S. 129), *Prinzip der Innozenz* (S. 130), *Prinzip der Fehler-minimierung* (S. 131), *Verhindern der Translationsbewegung* (S. 132), *Prinzip der Parameteroptimierung* (S. 133)
- **Streben nach Unabhängigkeit**  
*Entkoppeln* (S. 134), *Prinzip der Invarianz* (S. 135), *Selbstverstärkung* (S. 136), *Redundanz* (S. 136)
- **Bereich Anforderungen**  
*Anpassen der Anforderungen* (S. 137), *mit existierenden Fehlern arbeiten* (S. 138)
- **Sonstige**  
*Prinzip der Fehlerkompensation* (S. 139), *Trennung von Beanspruchung und Be-anspruchbarkeit* (S. 140).

Die Reihenfolge der Darstellung in der vorliegenden Arbeit entspricht der Reihenfolge der Aufzählung.

## Prinzip des Kinematic Design

**Erläuterung** Das Ziel des *Kinematic Design* ist ein eindeutig kinematisch bestimmtes System. Dies ermöglicht in der Folge die Beschreibung des Systemverhaltens. Zwänge

werden vermieden.<sup>9</sup> EBRO ET AL. (2012), S. 819,820 verwenden zur Analyse der Beweglichkeit eines Systems die *Kutzbach-Grübler-Gleichung*. Die Vor- und Nachteile dieses Vorgehens werden in FREUND ET AL. (2016) diskutiert.

### Wirkungsweise im RD Vorhersagbarkeit des Verhaltens, Eindeutigkeit (V)

**Beispiel** Abbildung 7.4 zeigt Beispiele zur Analyse von Kinematiken mit der *Kutzbach-Grübler-Gleichung*<sup>10</sup>. Abbildung 7.4a zeigt einen 4-Balken-Mechanismus dessen Beweglichkeit sich nach der *Kutzbach-Grübler-Gleichung* zu  $M = 3(4 - 1) - 4 \cdot 2 = 1$  berechnet, er ist *zwangsläufig*. Durch Anschluss bspw. eines Motors wird der verbleibende Freiheitsgrad festgelegt. Abbildung 7.4b hingegen zeigt einen 5-Balken-Mechanismus mit der Beweglichkeit  $M = 3(5 - 1) - 6 \cdot 2 = 0$ . Er ist vollständig statisch bestimmt und damit unbeweglich. Der Anschluss eines Motors würde das System überbestimmen und zu Zwangskräften führen.

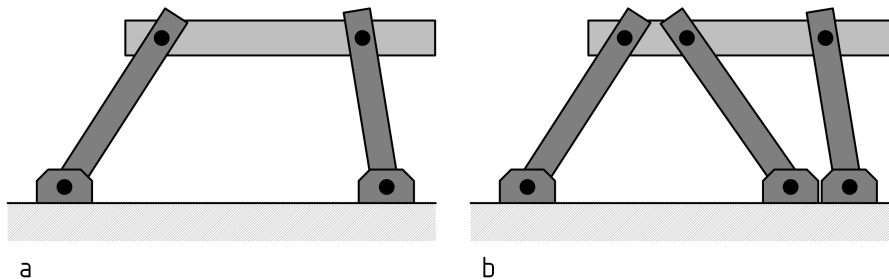


Abbildung 7.4: Kinematische Analysen eines Balkenmechanismus. a: 4-Balken-Mechanismus mit der Beweglichkeit 1. b: 5-Balken-Mechanismus mit der Beweglichkeit 0.<sup>11</sup>

### Prinzip des Exact Constraint Design

**Erläuterung** Das *Exact Constraint Design* wird der Grundregel der Eindeutigkeit zugeschrieben. Ziel des Exact Constraint Design ist es exakt so viele Bewegungen zu sperren wie zur Funktionserfüllung notwendig sind. Dies reduziert in der Folge die Anzahl der funktionsrelevanten Eigenschaften, vermeidet Zwangskräfte und unvorhersagbares Systemverhalten.<sup>12</sup>

<sup>9</sup>Vgl. KRAUSE (2012), S. 136-140; vgl. EBRO ET AL. (2012), S. 819-822; vgl. FRENCH (1994), S. 231; vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 495.

<sup>10</sup>In der allgemeinen Form lautet sie:  $M = 3(n - 1) - \sum U - \sum F_{id}$ , mit der Anzahl  $n$  an Verbindungen bzw. Körpern,  $F_{id}$  identischen Freiheitsgraden,  $U$  Zwangsbedingungen und der Mobilität  $M$  des Systems. Vgl. EBRO ET AL. (2012), S. 820.

<sup>11</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO ET AL. (2012), S. 819.

<sup>12</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 89-90; vgl. SUH (1990), S. 52.

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit des Verhaltens ( $V$ ), Fehlermöglichkeiten reduzieren ( $F$ ), Unabhängigkeit der Funktionen ( $U$ )

**Beispiel** In Abbildung 7.5a ist ein statisch überbestimmtes System mit sechs Einstellmöglichkeiten abgebildet. In Lösung b wurde die Zahl der Einstellschrauben auf die drei minimal notwendigen verringert. Die Anzahl der Eigenschaften wurde reduziert. Außerdem ist nun die Lage des Rechtecks eindeutig bestimmt.<sup>13</sup>

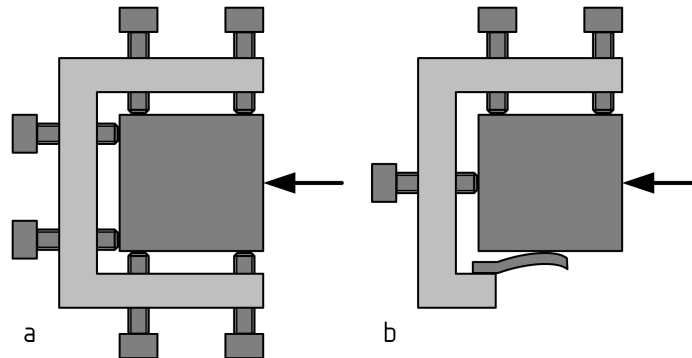


Abbildung 7.5: Überbestimmtes und kinematisch bestimmtes System.<sup>14</sup>

### Prinzip der definierten Kraftverzweigung

**Erläuterung** Das Ziel der *definierten Kraftverzweigung* ist ein statisch bestimmtes System trotz strukturell parallel angeordneten Bauteilen. Dies kann durch besonders hohe Betriebslasten oder durch unzulässig hohe Deformationen an der Krafteinleitungsstelle notwendig werden. Mit der definierten Kraftverzweigung kann auch eine Unabhängigkeit von Fertigungstoleranzen bzw. Deformation während der Nutzung erreicht werden.<sup>15</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit durch Eindeutigkeit ( $V$ )

**Beispiel** Die Axialkraft  $F$  in Abbildung 7.6 links soll über eine Wellenlagerung mit drei Kegelrollenlagern aufgenommen werden. Durch die Hebelanordnung wird die Kraft statisch bestimmt verzweigt. Schwankungen aus der Fertigung werden durch die gelenkige Abstützung ausgeglichen. Eine Alternative bestünde bspw. in einer hydrostatischen Lösung.<sup>16</sup>

---

<sup>13</sup>Vgl. BOOTHROYD ET AL. (2011), S. 113.

<sup>14</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BOOTHROYD ET AL. (2011), S.112.

<sup>15</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 140-142.

<sup>16</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 141-142.

<sup>17</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 141.

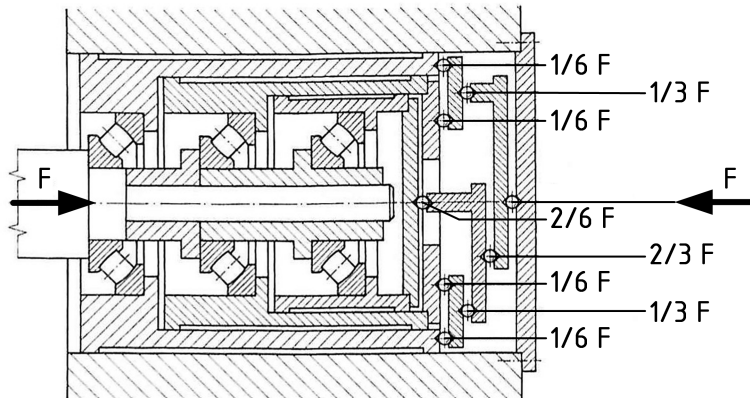


Abbildung 7.6: Kraftverzweigung der Axialkraft  $F$  auf drei Kegelrollenlager mittels Hebelanordnung.<sup>17</sup>

### Prinzip der Stabilität

**Erläuterung** Ein stabiles System ist dadurch gekennzeichnet, dass es nach einer Abweichung vom Arbeitspunkt selbstständig zu diesem zurückkehrt. Für das RD ist dies insofern nützlich, als dass es gelingen kann die Wirkung einer Störgröße zu nutzen um ihrer Entstehung entgegenzuwirken.<sup>18</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung der Störgröße reduzieren ( $A$ )

**Beispiel** Abbildung 7.7 zeigt eine berührungslose Ausgleichskolbendichtung. Lösungsvorschlag a ist wärmelabil ausgeführt. Dehnt sich das innere Teil aufgrund instationärer Erwärmung im Betrieb aus, reduziert sich der Dichtspalt, was die Wärmeentwicklung weiter erhöht. Die Lösung schadet sich selbst. Lösungsvorschlag b hingegen ermöglicht durch die umgekehrte Anordnung der Bauteile eine thermische Entlastung bei Erwärmung.<sup>19</sup>

### Prinzip der Bistabilität

**Erläuterung** Ein bistabiles System wechselt zwischen zwei definierten stabilen Zuständen. Während des Zustandswechsels stellt sich kein Zwischenzustand ein. Dieses Prinzip

<sup>18</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 573-574; vgl. CLAUSING und FREY (2005), S. 254-257.

<sup>19</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S.575.

<sup>20</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 575.

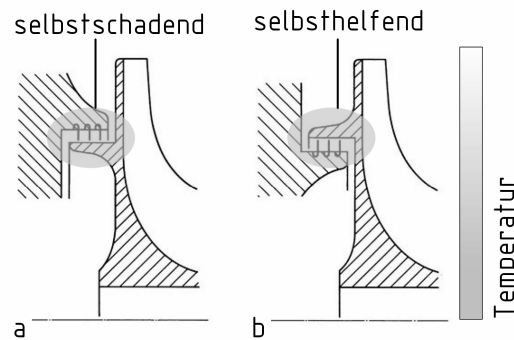


Abbildung 7.7: Ausgleichskolbendichtung an einem Turboladerrad.<sup>20</sup>

kann Schwankungen in Betriebslasten bei zumindest eingeschränkter Funktionalität ertragen. Beispielsweise eignet es sich zur Kompensation von Überlastsituationen.<sup>21, 22</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung der Störgröße reduzieren (*A*)

**Beispiel** Abbildung 7.8 zeigt ein Sicherheitsventil mit zwei definierten Zuständen. Die Vorspannkraft der Feder bestimmt den Grenzdruck ab dem das Ventil sich etwas öffnen kann. Da sich hierdurch jedoch auch die wirksame Fläche *A* des Innendrucks *p* schlagartig erhöht, springt das Ventil direkt in die zweite stabile Position (voll geöffnet).<sup>23</sup>

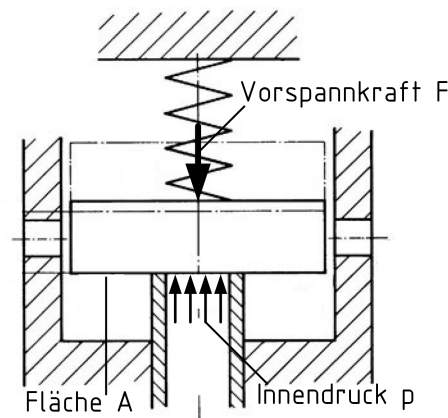


Abbildung 7.8: Bistabiles Sicherheitsventil.<sup>24</sup>

<sup>21</sup>Im Rahmen der Arbeit des *SFB 805* wird das *Prinzip der Bistabilität* auch zur Entwicklung *resilienter* Systeme eingesetzt, bei denen dynamische Selbstadaptation an unvorhersehbare Nutzungsumgebungen notwendig ist.

<sup>22</sup>Vgl. CLAUSING und FREY (2005), S. 257-258; vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 574-578.

<sup>23</sup>Vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 575.



## Prinzip der Verwendung von Spiel

**Erläuterung** Das *Prinzip der Verwendung von Spiel* beinhaltet die Vermeidung von Zwangskräften in überbestimmten Systemen durch das Auflösen von Wirkflächenpaaren auf Toleranzebene. Durch die Verwendung von Spielpassungen wird die Überbestimmtheit aufgelöst. Dies kann jedoch nur angewendet werden, wenn die genaue Position der Bauteile zueinander nicht relevant für die Funktionserfüllung ist.<sup>25</sup> Ist die Position relevant, kann eine Lösung in der Vorspannung der Teile bestehen.<sup>26</sup>

**Wirkungsweise im RD** Erzeugen von Vorhersagbarkeit ( $V$ ), Auswirkung von Schwankungen in Geometrieigenschaften reduzieren ( $A$ )

**Beispiel** In Abbildung 7.9 ist ein Schalter dargestellt, der auf eine Leiterplatte montiert werden soll. Das Bauteil soll hierbei jedoch nicht mechanisch belastet werden. Dies ist möglich durch das Vorsehen von Spiel in den Durchgangsbohrungen in der Platine. Innerhalb des Bereichs des Spiels haben nun Schwankungen der Bohrungs- und der Anschlussklemmenabstände keinen Einfluss mehr auf mechanische Zusatzbelastungen im Schalter.<sup>27</sup> Ein Beispiel für die Anwendung mit vorgespannten Elementen sind Spei-

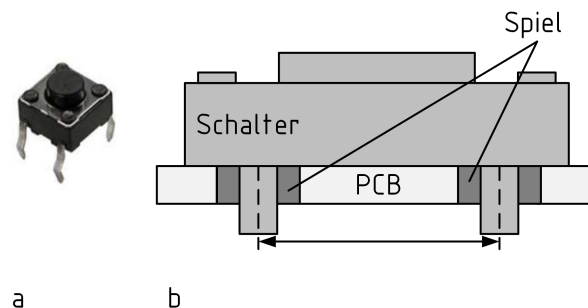


Abbildung 7.9: *Prinzip der Verwendung von Spiel* angewendet auf eine Verbindung zwischen einem Schalter und einer Leiterplatte.<sup>28</sup>

chenräder beim Fahrrad. Durch vorgespannte Speichen werden Deformationen während der Nutzung verringert. Die Steifigkeit des Rads wird bei niedrigem Gewicht erhöht.<sup>29</sup>

## Prinzip der engen Toleranzen

<sup>24</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 575.

<sup>25</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 93.

<sup>26</sup>Vgl. MCADAMS (2003), S. 361.

<sup>27</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 93.

<sup>28</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO und HOWARD (2016), S. 93.

<sup>29</sup>Vgl. MCADAMS (2003), S. 361.

**Erläuterung** Enge Toleranzen können dafür sorgen, dass Systeme trotz Uneindeutigkeit ihre Funktion erfüllen. Enge Toleranzen bedeuten kleine Schwankungen der funktionsrelevanten Eigenschaften. Allerdings sind enge Toleranzen, bspw. durch aufwendige Produktionsprozesse und hohen Ausschuss, immer mit erhöhten Kosten verbunden. Im RD sollte der Einsatz des Prinzips der engen Toleranzen tunlichst vermieden werden, da es Unsicherheit beherrscht indem es dafür sorgt dass keine Unsicherheit auftritt. Dies ist die schwächste Form des RD und sollte nur dann angewandt werden, wenn keine anderen Möglichkeiten verfügbar sind.

**Wirkungsweise im RD** Unsicherheit bzw. Störgröße reduzieren (*S*)

**Beispiel** Der Mechanismus in Abbildung 7.10 ist kinematisch überbestimmt<sup>30</sup>. Durch die besonderen geometrischen Gegebenheiten -Parallelität in den drei kurzen Balken- ist der Mechanismus dennoch beweglich. Dies gilt jedoch nur solange die Balken parallel sind. Kleinste Schwankungen in den Geometrieigenschaften bewirken ein Verklemmen des Mechanismus. Werden die Bauteile jedoch mit sehr geringen Toleranzen gefertigt, ist der Mechanismus beweglich.<sup>31</sup>

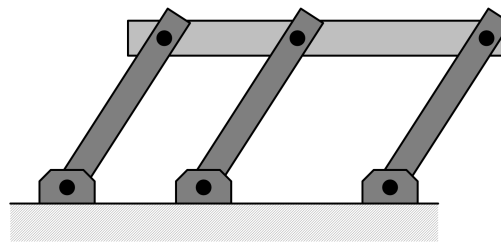


Abbildung 7.10: Prinzip der engen Toleranzen am Beispiel eines kinematisch überbestimmten Mechanismus.<sup>32</sup>

### Prinzip der Selbstpositionierung/-zentrierung

**Erläuterung** Das *Prinzip der Selbstpositionierung bzw. der Selbstzentrierung* löst die Uneindeutigkeit bei überbestimmten Systemen durch Hinzufügen eines zusätzlichen Freiheitsgrades auf. Dieser ermöglicht eine Selbstpositionierung bzw. -zentrierung während der Montage und im Betrieb. Die angreifenden Lasten werden gleichmäßig verteilt, es entstehen je nach Lösungsvariante keine, bzw. nur geringe, Zwangskräfte.<sup>33</sup>

---

<sup>30</sup>Nach dem *Kutzbach-Grübler-Kriterium* ergibt sich die Beweglichkeit  $M$  des Systems zu:  $M = 3(5 - 1) - (6 \cdot 2) = 0$ .

<sup>31</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 94.

<sup>32</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO ET AL. (2012), S. 820.

<sup>33</sup>Vgl. FRENCH (1994), S. 231.

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit erhöhen (*V*), Auswirkung von Unsicherheit reduzieren (*A*)

**Beispiel** Abbildung 7.11 zeigt drei Optionen für eine selbst-zentrierende Lagerung von Wellen. Der Außenring des Lagers in Lösung a kann durch die bogenförmige Ausföhrung der Wälzkörperlaufläche um die tangentielle Achse rotieren und so zwangskräftefrei Fluchtungsfehler oder Biegedeformationen durch Betriebslasten ausgleichen. In den Lösungen b und c liegt Funktionentrennung vor, die Selbstzentrierung wird durch ein zusätzliches konzentrisches Wirkflächenpaar (b) bzw. durch ein elastisches Element (c) realisiert.<sup>34</sup>

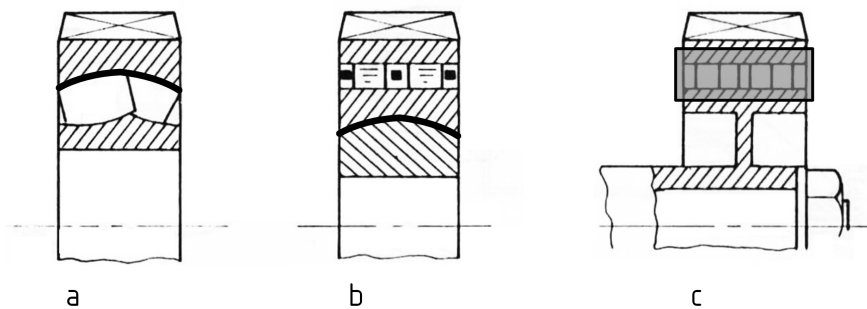


Abbildung 7.11: *Prinzip der Selbstpositionierung/-zentrierung* am Beispiel einer Wellenlagerung zum Ausgleich von Fluchtungsfehlern und Biegedeformationen im Betrieb in drei Lösungsvarianten.<sup>35</sup>

## Prinzip der Elastizität

**Erläuterung** Das *Prinzip der Elastizität* sieht die gezielte Verwendung von elastischen Elementen vor, um die Auswirkungen von Schwankungen zu verringern. Dabei wird die flache Steigung im Kraft-Weg-Zusammenhang ausgenutzt, um den Arbeitspunkt eines Systems in Bereichen niedriger Sensitivität anzuordnen. Eine niedrige Steifigkeit kann bspw. durch einen langen Kraftflussweg, aber auch durch Werkstoffe mit geringen Elastizitätsmoduln erreicht werden.<sup>36</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Unsicherheit verringern (*A*)

<sup>34</sup>Vgl. FRENCH (1992a), S. 168.

<sup>35</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach FRENCH (1992a), S. 168.

<sup>36</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 91-92; vgl. FRENCH (1992a), S. 219; vgl. HALE (1999), S. 82-83; vgl. SUH (2001), S. 45-46.

**Beispiel** Autofahrwerke sind statisch überbestimmt. Dennoch haben die Reifen in gewissen Grenzen und trotz Schwankungen in der Fahrbahn Kontakt zum Boden. Dies ist durch die elastische Aufhängung der Räder möglich. Ein weiterer Anwendungsfall des Prinzips der Elastizität sind Legosteine. Die benötigte Kraft zum Fügen zweier Steine unterliegt strengen Anforderungen und darf auch bei unterschiedlich alten Steinen nur sehr gering schwanken. Durch die Anwendung des Prinzips der Elastizität kann dies erfüllt werden. Die Kontaktzone ist bewusst nachgiebig ausgeführt, auf diese Weise haben Schwankungen aus der Produktion und Alterung nur einen geringen Einfluss auf die sich einstellende Pressung in der Kontaktzone, vgl. Abbildung 7.12.<sup>37</sup>

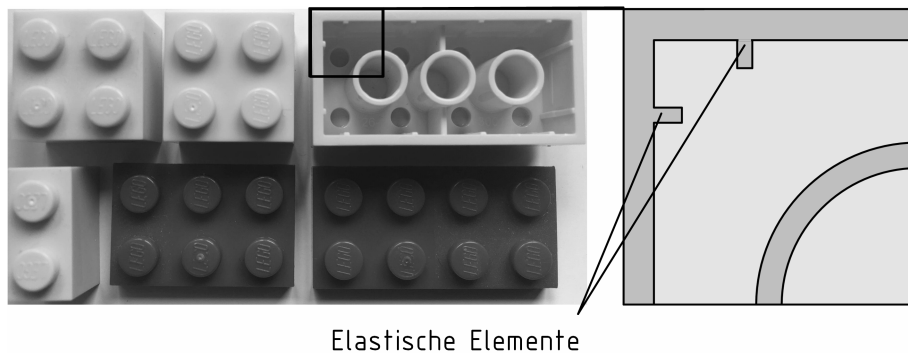


Abbildung 7.12: *Prinzip der Elastizität* angewandt bei Legosteinen.<sup>38</sup>

## Prinzip der Innozenz

**Erläuterung** Ein innozent System unterliegt Schwankungen in Objekteigenschaften, diese wirken sich jedoch nur durch Fehler zweiter oder höherer Ordnung auf die Funktionserfüllung aus und sind daher vernachlässigbar klein. Während das Prinzip der Invarianz nach Unabhängigkeit strebt, reduziert das Prinzip der Innozenz die Empfindlichkeit des Systems gegenüber einer Schwankung.<sup>39</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Schwankungen reduzieren (*A*) bzw. im Extremfall Unabhängigkeit von Schwankungen erreichen (*U*)

**Beispiel** Das Prinzip der Innozenz kann anhand des ABBE<sup>40</sup>-schen Komparatorprinzips aus der Messtechnik exemplifiziert werden. Die erste Zeile in Tabelle 7.1 zeigt zwei Aus-

<sup>37</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 92.

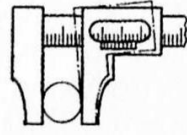
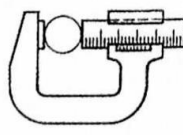
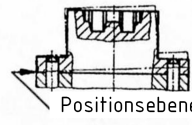
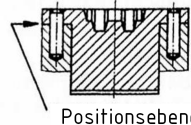
<sup>38</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO und HOWARD (2016), S.92.

<sup>39</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 132-136; Vgl. KOLLER (1998), S. 259.

<sup>40</sup>Ernst Karl Abbe (\* 23. Januar 1840 in Eisenach, Sachsen-Weimar-Eisenach; † 14. Januar 1905 in Jena, Sachsen-Weimar-Eisenach) war ein deutscher Physiker, Statistiker, Optiker, Industrieller und Sozialreformer.

führungen eines Messsystems. In der Abbildung links ist der Prüfling nicht in einer Linie mit dem Maßstab angeordnet. Eine Kippung des Maßstabes in Folge des bauartbedingten Spiels zwischen Lehre und Maßstab führt damit zu einer signifikanten Auswirkung auf das Messergebnis. In der Abbildung rechts liegen Prüfling und Maßstab auf einer Linie. Die Kippung des Maßstabes hat somit nur eine Auswirkung höherer Ordnung auf das Messergebnis.<sup>41</sup> Zeile zwei in Tabelle 7.1 zeigt die Umsetzung des Prinzips der Innozenz in einer Gehäusedeckel-Positionierung. Auf der linken Seite liegen Positionierungsebene und zu positionierende Flächen weit auseinander. Eine Schwankung in der Positionsebene wirkt sich entsprechend stark auf die zu positionierenden Flächen aus. Auf der rechten Seite fallen beide Ebenen beinahe aufeinander. Schwankungen wirken sich dadurch weniger stark aus, da die Fehler erster Ordnung deutlich verringert werden.<sup>42</sup>

Tabelle 7.1: ungünstig/besser-Beispiele zur innozenten Gestaltung. Quelle: KOLLER (1998), S. 259

| ungünstig   | besser  |
|---|---|
|   |   |
| zu positionierende Flächen<br><br>Positionsebene | zu positionierende Flächen<br><br>Positionsebene |

## Prinzip der Fehlerminimierung

**Erläuterung** Das *Prinzip der Fehlerminimierung* zielt auf eine möglichst geringe Sensitivität der Übertragungsfunktion ab.<sup>43</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Schwankungen reduzieren (*A*) bzw. im Extremfall Unabhängigkeit von Schwankungen erreichen (*U*)

**Beispiel** Das Prinzip der Fehlerminimierung wird in Abbildung 7.13 exemplifiziert. Die abgebildete Grenzmomentkupplung überträgt ein Moment reibkraftschlüssig mittels

<sup>41</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 134-135.

<sup>42</sup>Vgl. KOLLER (1998), S. 259.

<sup>43</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 130, S. 150; vgl. SUH (2001), S. 54-46.

der Reibscheiben (3) von der Welle (1) auf das Zahnrad (4). Die Kupplung kann als Sicherheitskupplung gegen Überlast eingesetzt werden, dazu muss das Grenzmoment jedoch unabhängig vom Verschleiß der Reibscheiben konstant bleiben. Erreicht wird das mit einer annähernd konstanten Anpresskraft durch die Tellerfeder (2). Bei kleinen Änderungen des Vorspannweges fallen die Änderungen in der Vorspannkraft sehr gering aus. Das Grenzmoment bleibt dadurch nahezu konstant.<sup>44</sup>

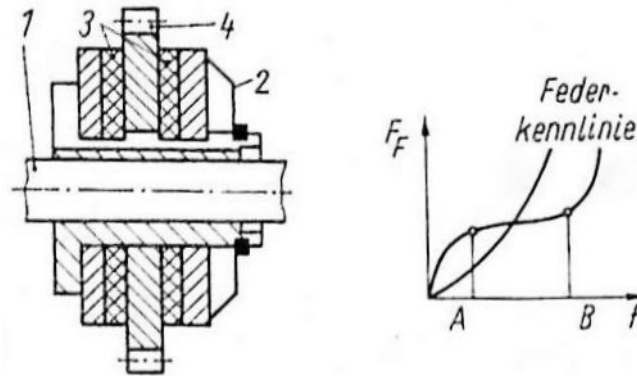


Abbildung 7.13: Grenzmomentkupplung: 1 - Welle, 2 - Scheibenfeder, 3 - Reibscheiben, 4 - Zahnrad.<sup>45</sup>

### Translationsbewegung des Schwerpunktes verhindern

**Erläuterung** Das *Verhindern der Translationsbewegung des Schwerpunktes* zielt auf das Entkoppeln im System ab. Durch geschickte Wahl der Positionierungspunkte auf Ebenen durch den Schwerpunkt fällt das Rotationszentrum auf den Schwerpunkt.<sup>46</sup> Dies verhindert eine Kopplung von Rotationen, bspw. in Folge von Abweichungen in Objekteigenschaften zur Positionierung, und Translationen des Objektes. Die Fortpflanzung von Unsicherheit im System wird so vermieden.

**Potential** Auswirkung von Unsicherheit reduzieren, bestenfalls eliminieren ( $A$ ,  $U$ )

**Beispiel** Abbildung 7.14 zeigt ein Positivbeispiel nach SÖDERBERG ET AL., S. 333-335. Die Stützpunkte zur Positionierung liegen auf Ebenen durch das Rotationszentrum. Dadurch wird eine Translation des Schwerpunkts bei abweichender Positionierung vermieden.<sup>47</sup>

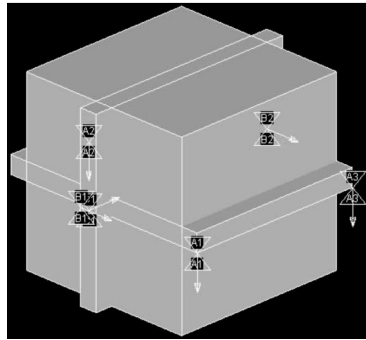
<sup>44</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S.150.

<sup>45</sup>Quelle: KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 150.

<sup>46</sup>Vgl. SÖDERBERG ET AL. (2006)(1), S. 337.

<sup>47</sup>Vgl. SÖDERBERG ET AL. (2006)(1), S. 333-335.

<sup>48</sup>Quelle: SÖDERBERG ET AL. (2006)(1), S. 355.

Abbildung 7.14: Verhindern der Translation des Schwerpunktes.<sup>48</sup>

### Parameter optimieren

**Erläuterung** Die robuste Optimierung stellt ein mächtiges Werkzeug zur Erhöhung der Robustheit von Systemen dar. Die Nichtlinearität von Übertragungsfunktionen kann gezielt ausgenutzt werden, indem der Arbeitspunkt des Systems an Stellen geringer Sensitivität verschoben wird.<sup>49</sup> Alternativ können bereits identifizierte funktionsrelevante Eigenschaften derart kombiniert werden, dass eine flache Übertragungsfunktion entsteht.<sup>50</sup> Es existieren viele Ansätze zur Bestimmung der Übertragungsfunktion und auch zur Lösung der Optimierungsprobleme. An dieser Stelle sei auf die Verwendbarkeit von analytischen Zusammenhängen, Simulationen und Experimenten hingewiesen. Ein konkreter Ansatz ist das sog. *Design of Experiments* (DoE). Mit dieser Methode werden die Abhängigkeiten zwischen Steuer- und Störgrößen untersucht und eine optimale Einstellung der Ausprägungen relevanter Eigenschaften mit einer minimalen Anzahl an funktionsrelevanten Eigenschaften gesucht.<sup>51</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkungen von Unsicherheit verringern ( $A$ ) bzw. eliminieren ( $U$ )

**Beispiel** Das übertragbare Drehmoment eines Querpressverbandes ist stark vom anliegenden Ist-Übermaß zwischen den beiden Passteilen Welle und Nabe abhängig. Abbildung 7.15 zeigt zwei Lösungsmöglichkeiten für einen solchen Querpressverband. In Abbildung 7.15 a wird die benötigte Verspannung zwischen den Bauteilen über ein kleines Übermaß und eine große Klemmlänge realisiert. In Abbildung 7.15 b wird ein wesentlich höheres Übermaß bei kleiner Klemmlänge realisiert. Hierbei reagiert Lösung b deutlich weniger empfindlich auf Fertigungsschwankungen. Entsprechend können die beiden Bauteile jeweils mit größeren Toleranzen hergestellt werden. Gleichzeitig ist es

<sup>49</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 88.

<sup>50</sup>Vgl. ULRICH und EPPINGER (2008), S. 268.

<sup>51</sup>Vgl. TAGUCHI ET AL. (2005), S. 503.

wesentlich einfacher eine Passung über eine kurze Länge sicherzustellen, als über eine lange Bearbeitungsfläche<sup>52</sup>

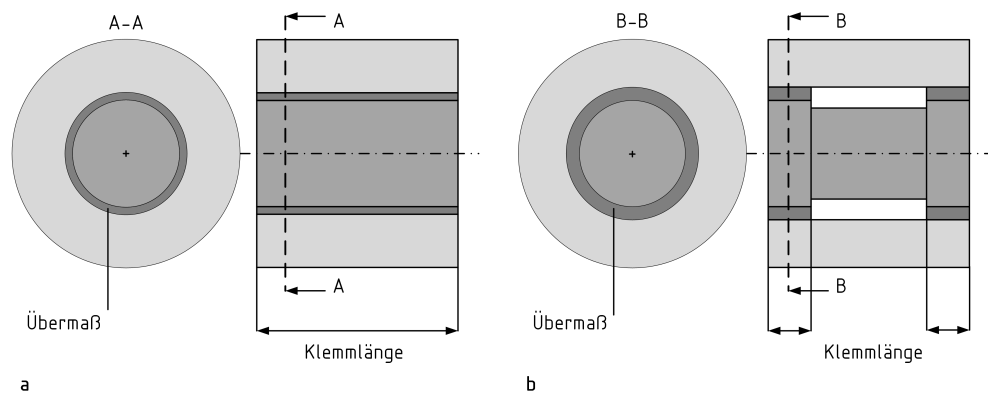


Abbildung 7.15: Optimierter Presssitz.<sup>53</sup>

## Entkoppeln gekoppelter Systeme

**Erläuterung** Das Prinzip des Entkoppelns unterscheidet zwischen ungekoppelten, entkoppelten und gekoppelten Systemen. Abbildung 7.16 stellt die drei Fälle schematisch dar. In gekoppelten Systemen, vgl. Abbildung 7.16 a, hängen mehrere Funktionen von einem Design Parameter ab. Dies ist insofern problematisch, als dass die für die Erfüllung der einzelnen Teilfunktionen erforderliche optimale Ausprägung der Eigenschaft unter Umständen nicht übereinstimmt. Hierdurch kann es zu unzureichender Funktionserfüllung kommen, oder aber es müssen starke Kompromisse gefunden werden. Ziel des Entkoppelns ist es daher die Abhängigkeiten zwischen Teilfunktionen zu entfernen. Bei sogenannten entkoppelten Systemen besteht zwischen den Funktionen jeweils nur eine Relation, insgesamt entsteht eine Kette. Im Fall der Abbildung 7.16 b wirkt sich eine Änderung in Funktion A so auf alle anderen Teilfunktionen aus. Die Funktionserfüllung kann durch sequentielles Einstellen von A bis D erfolgen. Im ungekoppelten System ist dieses Vorgehen obsolet, die Teilfunktionen sind unabhängig voneinander, vgl. Abbildung 7.16 c. Entsprechend wirken sich Schwankungen in einer Teilfunktion nicht auf die anderen aus.

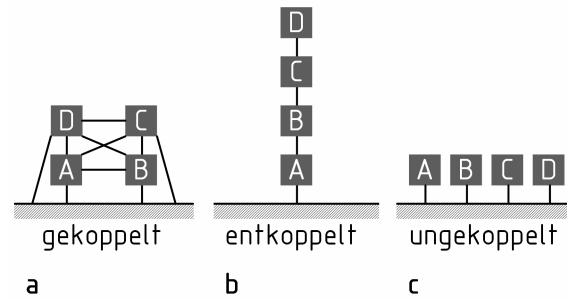
## Wirkungsweise im RD Unabhängigkeit ( $U$ )

<sup>52</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 88.

<sup>53</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO und HOWARD (2016), S.88.

<sup>54</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EBRO und HOWARD (2016), S. 89.



Abbildung 7.16: Gekoppeltes, entkoppeltes und ungekoppeltes System.<sup>54</sup>

**Beispiel** Wasserarmaturen existieren in verschiedenen Ausführungen. Die klassische Mischbatterie verfügt über zwei getrennt steuerbare Ventile für heißes und kaltes Wasser. Der Wasservolumenstrom ist abhängig vom Öffnungsgrad der beiden Ventile; die Wassertemperatur ist vom Verhältnis der beiden Öffnungsgrade abhängig. Wird nun der Wasservolumenstrom durch Drehen an einem Drehknopf verändert, ändert sich auch die Wassertemperatur des Wassers und umgekehrt. Wasservolumenstrom und Wassertemperatur sind also gekoppelt. Bei Einhandmischern hingegen werden Temperatur und Wassermenge durch zwei unabhängige Bewegungen gesteuert. Das System ist ungekoppelt, Wasservolumenstrom und Wassertemperatur können jeweils getrennt voneinander eingestellt werden.<sup>55</sup>

### Prinzip der Invarianz

**Erläuterung** Das *Prinzip der Invarianz* strebt eine Unabhängigkeit eines Systems von möglichen Störgrößen und Schwankungen an. Entsprechend können alle Richtlinien, die die Sensitivität einer Übertragungsfunktion vollständig eliminieren, diesem Prinzip zugeordnet werden. Während das Prinzip des Entkoppelns zunächst auf funktionale Zusammenhänge abzielt, befasst sich das Prinzip der Invarianz direkt mit unsicherheitsbehafteten Eigenschaften.<sup>56</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Schwankungen eliminieren (*A*), Unabhängigkeit erzeugen (*U*)

**Beispiel** Abbildung 7.17 zeigt eine Struktur die invariant gegenüber Verkipfung in Folge von Führungsspiel ist. Die Wirkflächen der Druckstelze an der Ober- und Unterseite sind ballig ausgeführt und liegen auf einem gemeinsamen Radius. Der Abstand zwischen

<sup>55</sup> Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 89-90; vgl. SUH (1990), S. 52.

<sup>56</sup> Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 132; vgl. SUH (2001), S. 47-48 .

An- und Abtrieb bleibt daher konstant, auch wenn die Druckstelze wegen des Spiels in der Linearführung kippt.<sup>57</sup>

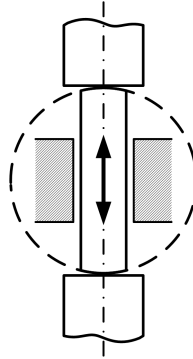


Abbildung 7.17: Spielinvariante Anordnung einer Druckstelze.<sup>58</sup>

### Prinzip der Selbstverstärkung

**Erläuterung** Das *Prinzip der Selbstverstärkung* strebt danach die während der Nutzung auftretenden Größen durch geschickte Anordnung der Systemelemente zur Funktionserfüllung zu nutzen.<sup>59</sup> Das Prinzip wird bei vielen Konstruktionen eingesetzt.

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung der Schwankung eliminieren ( $U$ )

**Beispiel** Bei *Trommelbremsen* werden die Betätigungskräfte verringert, bei Radialwellendichtringen<sup>60</sup> wird bei Erhöhung des Innendruckes die zum Abdichten benötigte Anpresskraft erhöht, was die Dichtwirkung auch unter schwankendem Innendruck sicherstellt.

### Prinzip der Redundanz

**Erläuterung** Das *Prinzip der Redundanz* ist eine Maßnahme der unmittelbaren Sicherheitstechnik. Redundante Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie mehr als zur reinen Funktionserfüllung notwendige Teilsysteme haben. Tritt ein Versagen oder eine Störung auf, kann die Funktion über die zusätzlichen Funktionsträger sichergestellt werden. Das System ist also in einem gewissen Rahmen robust gegenüber (Teil-)systemausfällen.

---

<sup>57</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 134.

<sup>58</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 134.

<sup>59</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 565-573; vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 144-147.

<sup>60</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 568; vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 91.

Vor allem in Zusammenhang mit Gefährdung ist Redundanz weit verbreitet.<sup>61</sup> Es wird unterschieden zwischen *warmer* und *kalter Redundanz*.<sup>62</sup> Bei kalter Redundanz springt das Ersatzsystem bei Ausfall des Hauptsystems ein; bei warmer Redundanz wirken alle Teilsysteme parallel, jedoch nicht maximal ausgelastet. Eindeutigkeit ist bei warmer Redundanz nicht immer sichergestellt, kann jedoch z.B. durch Lastausgleich erreicht werden<sup>63</sup>. Redundanz bedeutet immer zusätzliche Ressourcen, Bauteile und damit auch Kosten. Daher sollte sie, insbesondere bei warmer Redundanz, grundsätzlich vermieden werden.<sup>64</sup>

**Wirkungsweise im RD** Unabhängigkeit des Systems von Teilsystemausfällen ( $U$ )

**Beispiel** Abbildung 7.18 zeigt je ein Beispiel für homogene (a) und diversitäre (b) Redundanz. Bei homogener Redundanz werden Funktionsträger mehrfach verwendet. Diversitäre Redundanz nutzt unterschiedliche Wirkprinzipien, systematische Fehler können so vermieden werden. Die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Ausfalls sinkt. In Abbildung 7.18 (b) werden ein Sicherheitsventil und eine Berstscheibe genutzt, um das System vor Überdruck zu schützen. Es herrscht Prinzipiredundanz.<sup>65,66</sup>

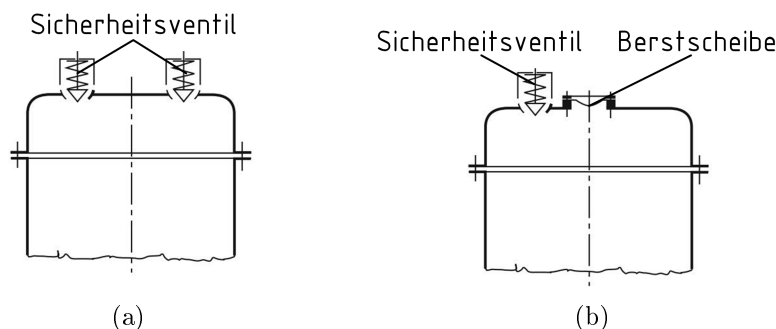


Abbildung 7.18: Homogene (a) und diversitäre (b) Redundanz.<sup>67</sup>

## Anforderungen ändern

<sup>61</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 522-523; Vgl. KOLLER (1998), S. 209; Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 122-135.

<sup>62</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2007), S. 126 und S. 127.

<sup>63</sup>Vgl. EHRENSPIEL und MEERKAMM (2013), S. 506-510.

<sup>64</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 195.

<sup>65</sup>Vgl. BIRKHOFER und KLOBERDANZ (2007), S. 127.

<sup>66</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 523.

<sup>67</sup>Quelle: Eigene, abgeänderte Darstellung nach FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 523.

**Erläuterung** Das Prinzip der Änderung von Anforderungen bindet die Möglichkeit einer Veränderung der ursprünglich festgelegten Anforderungen bewusst in die Entwicklung mit ein, wenn sie schwer zu erfüllen sind. Gründe hierfür können Fehleinschätzungen und unter Unsicherheit getroffene Abschätzungen in frühen Phasen der Entwicklung sein.<sup>68</sup> Durch die Anpassung der als zulässig bewerteten Schwankungsbreite kann ein ursprünglich nicht robustes Konzept als robust gelten. Gleichwohl dieses Vorgehen in der Industrie Anwendung findet und der Vollständigkeit halber hier aufgeführt ist, ist dieses Prinzip im RD nicht priorisiert zu verwenden. Von Bedeutung ist jedoch das Bewusstsein in Bezug auf die Relevanz sorgfältig geklärter Anforderungen. Anforderungen müssen nur dann geändert werden, wenn sie zu Beginn unzureichend erfasst, dokumentiert und gepflegt wurden.

**Wirkungsweise im RD** zulässige Schwankung in der Funktionserfüllung erhöhen (*B*)

**Beispiel** EBRO und HOWARD exemplifizieren das Prinzip der Änderung von Anforderungen anhand einer TV-Halterung. Der ursprünglich zulässige Wert für eine Winkelabweichung zur Horizontalen betrug  $0,5^\circ$ . Im Verlauf der Entwicklung zeigte sich, dass die Anforderung sehr schwer zu erfüllen war. Eine Nutzerumfrage ergab jedoch dass eine Abweichung von bis zu  $1,5^\circ$  von diesen nicht als störend wahrgenommen wurde. In der Folge konnte die Anforderung angepasst werden.<sup>69</sup>

### Mit existierenden Fehlern arbeiten

**Erläuterung** Unsicherheit in Objekteigenschaften kann beherrscht werden, wenn beim Einbau von zusätzlichen Systemen das schwankende System als Referenz dient. Das nachfolgende Teilsystem passt dann trotz der vorhandenen Schwankungen in das erste Teilsystem und kann seine Funktion erfüllen, Fehler müssen nicht aufwändig ausgemerzt werden.<sup>70</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung der Schwankung reduzieren, zulässige Schwankung vergrößern (*A*, *U*)

**Beispiel** Abbildung 7.19 zeigt einen zur Lotrechten gekippten Türrahmen. Wird die Tür nun lotrecht montiert, entstehen wahrnehmbar variable Spalte an den Rändern der Tür. Wird die Tür am Koordinatensystem der Zarge ausgerichtet, entsteht kein störender Eindruck mangelnder Qualität.<sup>71</sup>

---

<sup>68</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 99; Vgl. SUH (2001), S.50

<sup>69</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 99.

<sup>70</sup>Vgl. MCADAMS (2003), S. 364-365.

<sup>71</sup>Vgl. MCADAMS (2003), S. 365.

<sup>72</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach MCADAMS (2003), S. 365.

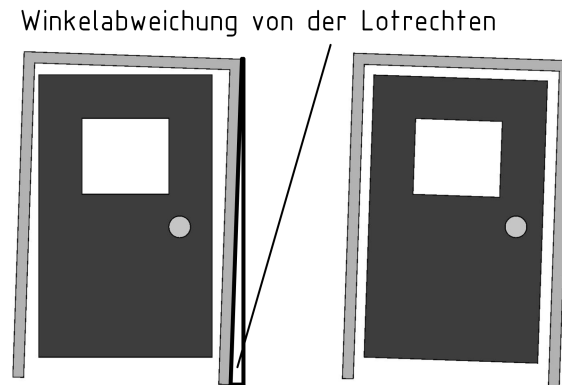


Abbildung 7.19: Mit existierenden Fehlern arbeiten am Beispiel einer schiefen Tür.<sup>72</sup>

### Prinzip der Fehlerkompensation

**Erläuterung** Bei der Fehlerkompensation wird die Auswirkung von Unsicherheit in der Nutzung durch Anpassen des Arbeitspunktes mittels eines Regelkreises oder einer Steuerkette kontinuierlich kompensiert.<sup>73</sup> Auf Basis des *Prinzips der Fehlerkompensation* lassen sich Strategien basierend auf dem Eingangssignal und auf der Antwort eines Systems ableiten:

- Eingangssignalbasiert<sup>74</sup>
  - nur das gewünschte Signal verstärken
  - gewünschtes Signal und Störgrößen unter bestimmten Umständen unterdrücken
  - Eingangssignal so ändern, dass bestimmte Eigenschaften kompensiert werden
  - Störsignal unterdrücken durch Ändern des Eingangssignals
- Antwortsignalbasiert<sup>75</sup>
  - Mittelwert über Ausgangssignal bilden
  - zwei gleiche, aber entgegengesetzten Ausgangssignale voneinander abziehen
  - Auswirkung der Störgröße mit zusätzlichen Elementen erkennbar machen
  - Eingangssignal anpassen, wenn das tatsächliche Ausgangssignal vom Eingangssignal abweicht
  - Ausgangssignal durch Vergleich mit Maßstab kalibrieren bzw. den bekannten Fehler abziehen

<sup>73</sup>Vgl. hierzu JUGULUM und FREY (2007).

<sup>74</sup>Vgl. JUGULUM und FREY (2007), S. 146.

<sup>75</sup>Vgl. JUGULUM und FREY (2007), S. 154.

## Beanspruchung und Beanspruchbarkeit separieren

**Erläuterung** In den Ingenieurwissenschaften werden Beanspruchungen und Beanspruchbarkeit meist als deterministische Werte verglichen und so der Festigkeitsnachweis erbracht. Hierbei werden üblicherweise zusätzliche Sicherheitsbeiwerte verwendet. In der Realität sind Beanspruchung und Beanspruchbarkeit jedoch statistisch verteilte Größen, vgl. Abbildung 7.20. Ein Versagen tritt dann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf, wenn eine Überlappung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Kenngrößen auftritt. Umgekehrt ist ein Versagen bei kleiner Überlappung unwahrscheinlich. Sicherheitsbeiwerte sorgen für Abstand zwischen den Mittelwerten von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit und erfüllen damit diese Funktion (zu Lasten von Ressourcen). Allerdings kann der gewünschte Effekt auch durch geringe Schwankungsbreiten erzielt werden. Dies ist der Grundgedanke des *Prinzips der Separierung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit*. Für das RD kann das Prinzip wirksam werden, indem Unsicherheit direkt reduziert wird.<sup>76</sup>

**Wirkungsweise im RD** Unsicherheit verringern durch Informationszuwachs (*S*)

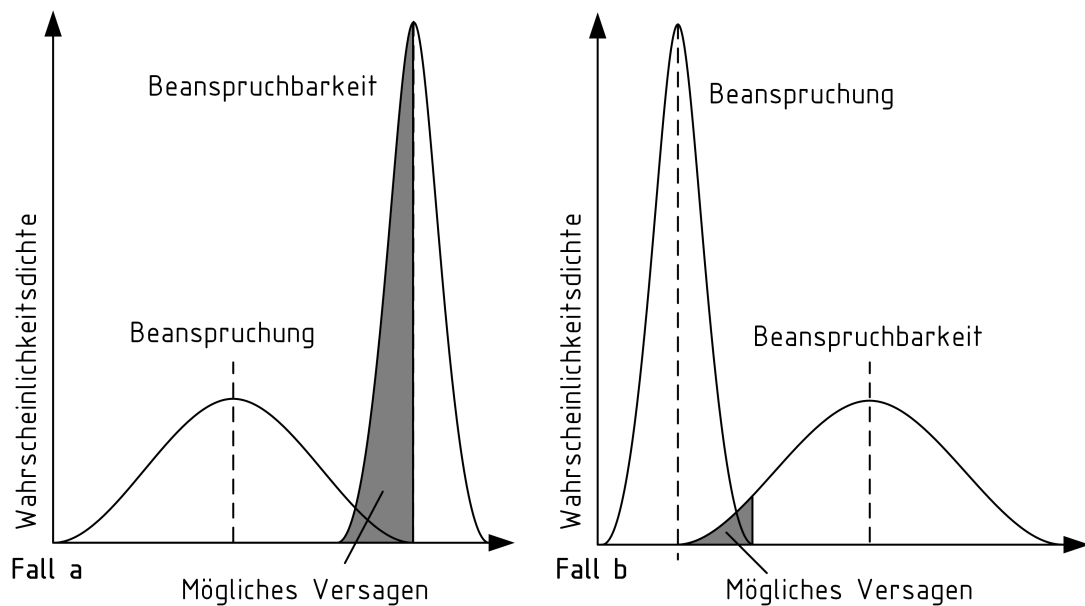


Abbildung 7.20: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit.<sup>77</sup>

<sup>76</sup>Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 198-211; vgl. HANSELKA und PLATZ (2010), S. 56,60.

<sup>77</sup>Quelle: Eigene Darstellung nach MATTHIASSEN (1997), S. 203.

**Beispiel** Abbildung 7.20 illustriert zwei mögliche Kombinationen von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit jeweils repräsentiert durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Sicherheitsbeiwert und Schwankungsbreiten sind gleich. In Fall (b) hat die Beanspruchbarkeit eine breite Verteilung. Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen des Bauteils, eingefärbte Fläche, ist im Vergleich deutlich geringer als in Fall (a). Durch geschickte Informationsgewinnung kann also die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen deutlich reduziert werden, ohne dies durch weitere Überdimensionierung mittels Sicherheitsbeiwerten zu erreichen.<sup>78</sup>

## 7.2 Funktionaler Zusammenhang - Umgang mit Störgrößen

Störgrößen treten in vielfältiger Form während allen Lebenszyklusphasen auf. Im Verständnis dieser Arbeit wirken sie entweder von außen auf das technische Produkt ein, oder sie entstehen in der Wechselwirkung zwischen technischem Produkt und Prozess in Form von Nebengrößen. Der Begriff Störgröße referenziert auf die potentiell negative Wirkung auf die Funktionserfüllung des technischen Produktes. In Anlehnung an MATHIAS (2015), S. 46 werden Störgrößen gemäß Definition 7.2.1 verstanden.

### Definition 7.2.1.: Störgröße

*Störgrößen* sind ungewollte, bzw. für die technische Funktion unerhebliche, Größen, die auf das Verhalten eines Systems, eines Prozesses und/oder eines Produkts wirken und zu Abweichungen der Ausgangsgrößen von den gewünschten Ausgangsgrößen führen können. □

### 7.2.1 Prinzipien zum Umgang mit Störgrößen

#### Prinzip der Abschirmung von Störgrößen

**Erläuterung** Kann ein technisches System nicht unempfindlich gegenüber einer Störgröße gestaltet werden, stellt das *Prinzip der Abschirmung* eine Alternative dar. Ziel der Abschirmung ist es Störgrößen an ihrer Einwirkung auf das System zu hindern. Häufig sind hierfür zusätzliche Bauteile nötig. Das Prinzip findet vielfältig Anwendung in technischen Systemen.<sup>79</sup>

**Wirkungsweise im RD** Einfluss von Störgrößen eliminieren (*E*)

---

<sup>78</sup>Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 203-204.

<sup>79</sup>Vgl. EBRO und HOWARD (2016), S. 95-96; vgl. MATHIAS (2015), S. 106.

**Beispiel** Koaxialkabel nutzen den physikalischen Effekt der *Influenz*, um Signale vor Störfeldern zu schützen, vgl. Abbildung 4.15 auf S.71.

### Das Prinzip der kurzen und direkten Kraftleitung

**Erläuterung** Das *Prinzip der kurzen und direkten Kraftleitung* strebt nach möglichst kurzen Kraftleitungswegen. Dies wirkt sich in zweierlei Hinsicht robustheitsförderlich aus. Zum einen steigt bei weiten Kraftleitungswegen die Wahrscheinlichkeit das bspw. durch Fertigungsfehler Verformungen und Beanspruchungen unvorhersehbar groß werden. Andererseits wird eine gestalterisch vermeidbare Spannungsspitze als zu vermeidende Störgröße interpretiert.<sup>80</sup> Kurz und prägnant formuliert lautet das Prinzip der kurzen und direkten Kraftleitung: „Kräfte nicht spazieren führen!“<sup>81</sup>

**Wirkungsweise im RD** Störgröße *mechanische Beanspruchung* minimieren (*S*), Einfluss der Störgröße reduzieren (*E*)

**Beispiel** Abbildung 7.21 zeigt drei verschiedene Lösungsvarianten zur Leitung der Kraft *F*: a indirekt, b indirekt und symmetrisch und c direkt. An den mit einem schwarzen Pfeil markierten Stellen ist die Beanspruchung jeweils gleich groß. Der Einfluss des längeren Kraftleitungsweges und der Art der Kraftleitung (a und b erfahren Biegung, c ist rein zugbelastet) schlägt sich in den unterschiedlichen Querschnitten nieder. Die biege-belasteten Strukturen sind mit einem deutlich höheren Ressourcenaufwand verbunden.<sup>82</sup>

### Prinzip des Kraftausgleichs

**Erläuterung** Das *Prinzip des Kraftausgleichs* strebt nach der Eliminierung von prozessbegleitenden Nebengrößen in Form von Kräften. Dies kann bspw. durch die Umsetzung des *Prinzips der Symmetrie*, oder die Verwendung von Ausgleichselementen realisiert werden, wobei die Nebengrößen möglichst nah am Entstehungsort ausgeglichen werden sollen, um Zusatzbelastungen klein zu halten.<sup>84</sup>

**Wirkungsweise im RD** Störgröße *Nebengröße* reduzieren (*S*), Einfluss der Störgröße reduzieren (*E*)

---

<sup>80</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 542-545; Vgl. FRENCH (1994), S. 233; Vgl. ROTH (2000), S. 157.

<sup>81</sup>Vgl. ROTH (2000), S. 157.

<sup>82</sup>Vgl. LEYER (1964), S. 25.

<sup>83</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach LEYER (1964), S. 24.

<sup>84</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 549-552; vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 140-144; vgl. FELDHUSEN ET AL. (2014), S. 374-375.



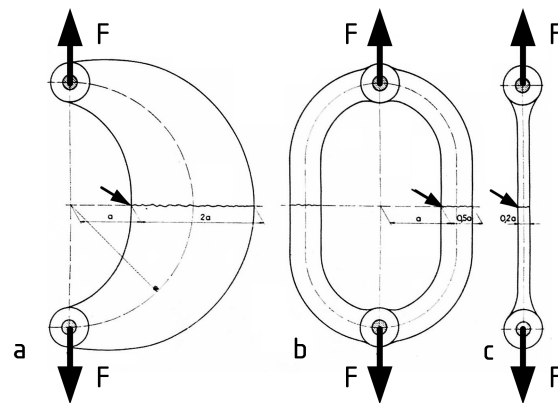


Abbildung 7.21: Vergleich dreier verschiedener Lösungsvarianten zur Leitung der Kraft  $F$  bei gleicher maximaler Beanspruchung: a indirekt, b indirekt und symmetrisch und c direkt.<sup>83</sup>

**Beispiel** Abbildung 7.22 zeigt mögliche Lösungsvarianten zum Kraftausgleich bei einer Strömungsmaschine und einem einstufigen Getriebe mit Schrägverzahnung. Es ist jeweils eine Lösungsvariante ohne Anwendung des *Prinzips des Kraftausgleichs*, eine Lösungsvariante mit Ausgleichselementen und eine Lösungsvariante mit symmetrischer Anordnung dargestellt. Welche die sinnvollste ist hängt maßgeblich von der Höhe der Axialkräfte ab. Bei relativ kleinen Axialkräften ist ein Ausgleich obsolet. Bei mittleren Axialkräften empfiehlt sich die Wahl eines Ausgleichselements. Bei großen Axialkräften stellt eine symmetrische Anordnung die beste Lösung dar.<sup>85</sup> Eine weitere Anwendung des Prinzips des Kraftausgleichs findet sich in rotierenden Systemen, wo durch Gegengewichte der Einfluss von Zentripetalkräften ausgeglichen werden kann. Beispielsweise werden Autoreifen ausgewuchtet, indem am Rand der Felge kleine Gegengewichte angebracht werden. Die aus der zusätzlichen Masse bei Rotation entstehenden Zentripetalkräfte sind betragsmäßig gleich den durch die Unwucht entstehenden Kräften, wirken jedoch richtungsmäßig entgegengesetzt. In der Folge wird die Radachse durch die Drehung nicht mehr dynamisch belastet.

### Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen

**Erläuterung** Das *Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen* strebt möglichst kleine Verbindungszonen an. Durch die Verkleinerung des Verbindungsbereiches ist es einfacher diesen vor Störgrößeneinflüssen zu schützen. Grundsätzlich sollten elastische Elemente vor Verbindungen mit Drehachse und diese vor Verbindungen mit translatorischer Bewegung vorgezogen werden. Drehgelenke und elastische Elementen-

<sup>85</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 551-552.

<sup>86</sup>Quelle: FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 551.

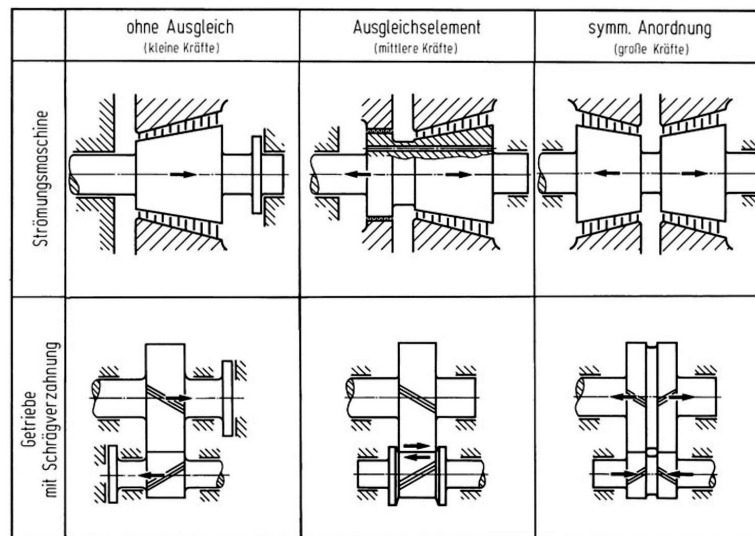


Abbildung 7.22: Lösungsmöglichkeiten zum Kraftausgleich.<sup>86</sup>

te erweisen sich außerdem als weniger anfällig für Schwankungen im System wie z. B. Verformungen.<sup>87</sup>

**Wirkungsweise im RD** Einfluss und Auswirkung von Störgrößen verringern ( $E$ ,  $A$ )

**Beispiel** Abbildung 7.23 zeigt zwei Lösungskonzepte für den Mechanismus einer Nähmaschine. Das Kurvengetriebe in Abbildung 7.23a ist anfällig für Staub und benötigt eine hohe Anpresskraft für eine zuverlässige Bewegungsübertragung auch bei schnellen Drehzahlen. Der Mechanismus in Abbildung 7.23b nutzt vier kompakte Drehgelenke und kann damit als robuster gegenüber Störgrößen wie Staub gelten.<sup>88,89</sup>

## 7.2.2 Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen

Das Themenfeld der Konstruktionshinweise zur *Beherrschung von Störgrößen* übersteigt das Platzangebot im Rahmen dieser Arbeit. Im Anhang befinden sich daher die folgenden Tabellen mit robustheitsförderlichen Richtlinien:

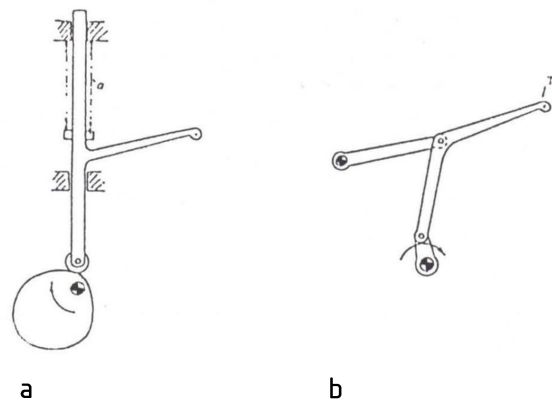
- *Richtlinien zum Umgang mit mechanischer Beanspruchung*, (Tabelle C.3)

<sup>87</sup>Vgl. FRENCH (1994), S. 232; Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 184-185.

<sup>88</sup>Vgl. MATTHIASSEN (1997), S. 185.

<sup>89</sup>Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit sollten nach FRENCH dichtende Verbindungen gewählt werden, vgl. FRENCH (1994), S. 231. Dieser Hinweis fordert zur Funktionsintegration von Dichten und Fügen in ein Wirkflächenpaar auf; für eindeutige Funktionen und Vorhersagbarkeit sollten die Funktionen jedoch unterschiedlichen Wirkflächen zugeordnet werden. Der Hinweis ist damit dem RD abträglich.

<sup>90</sup>Quelle: MATTHIASSEN (1997), S.185.

Abbildung 7.23: Vergleich von zwei Mechanismen einer Nähmaschine.<sup>90</sup>

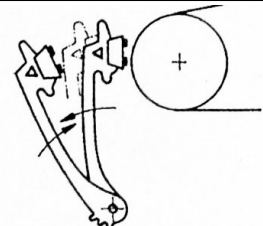
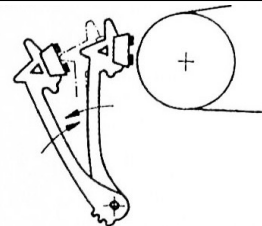
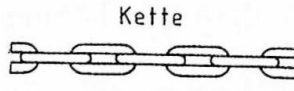
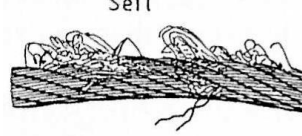
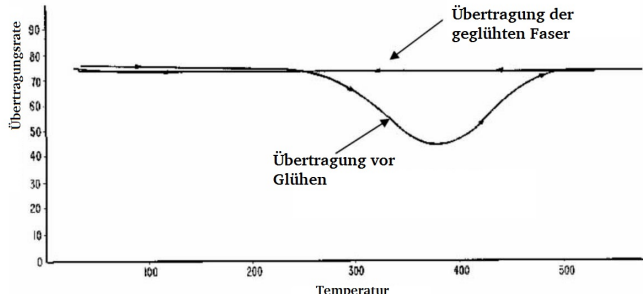
- *Richtlinien zum Umgang mit Wärme,*  
(Tabelle C.2)
- *Richtlinien zum Umgang mit Feuchte,*  
(Tabelle C.4)
- *Richtlinien zur elektromagnetischen Verträglichkeit,*  
(Tabelle C.5).

An dieser Stelle werden die RD-tauglichen *Richtlinien zum allgemeinen Umgang mit Störgrößen*, vgl. Tabelle 7.2, detailliert vorgestellt.

Tabelle 7.2: Gestaltungshinweise zum *allgemeinen Umgang mit Störgrößen*.

Quelle: JUGULUM und FREY (2007), S. 146-148; KOLLER (1998), S. 210-211; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 195-196

| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig | besser |
|------|---|-----------|--------|
| A    | Anwendung von Systemen deren Funktionsfähigkeit auch unter sich ändernden Umständen gewährleistet ist |           |        |
| A    | Ruhestromprinzip verwenden  |           |        |

|   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| A | Stoßflächen/-fänger, Puffer vorsehen   |    |  |
| K | Systeme verwenden, die ihr Versagen langfristig anzeigen   |    |  |
| A | während der Herstellung Störgröße aufbringen, um das System im Betrieb weniger empfindlich gegen die Störgröße zu machen | <p>Optische Fasern mit Metallüberzug werden im Hochtemperaturbereich angewendet. Ihre Übertragungsfähigkeit nimmt jedoch im Temperaturbereich von 225°C bis 500°C mit einem Minimum bei 350°C ab. Um eine gleichmäßige Übertragungsfunktion über den gesamten Temperaturbereich zu erhalten werden die Fasern bei 500°C gegläht. Das Aufbringen der Betriebstemperatur in der Herstellungsphase erzeugt eine Insensitivität der Übertragung gegenüber der Temperatur in der Nutzungsphase.<sup>91</sup></p>  |   |
| S | nutze das thermodynamisch günstigste Prinzip   | z.B. Arbeitstemperatur nah an der Außentemperatur, niedrigster Druck, etc.   |   |
| S | keine Universalgeräte schaffen, Streuung in Nutzung wird zu groß, nicht mehr durch ein Arbeitsmittel abzudecken          |  |   |
| E | Geräte vor wesentlichen Umwelteinflüssen schützen  |  |   |
| F | einfache, übersichtliche, narrensichere Bedienung vorsehen   |  |   |
| E | Störsignal durch ein entgegengesetztes Signal ausgleichen  |  |   |

<sup>91</sup>JUGULUM und FREY (2007), S. 149.

|   |   |
|---|---|
| E | Rauschen herausfiltern  |
| S | Störsignal möglichst nah an der Quelle verkleinern/ eliminieren                   |
| A | strukturelle Redundanz in Form von belasteter/ unbelasteter Reserve vor-<br>sehen |

Grundsätzlich sollte bei der Entwicklung beachtet werden, dass die Umgebungen der Produktnutzung sich verändern können. Nach Identifikation der möglichen auftretenden Störgrößen können im nächsten Schritt Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Diese sollten bestenfalls die Auswirkungen der Störgrößen eliminieren.

Wenn möglich sollten physikalische Effekte derart genutzt werden, dass sich auch ohne Aufrechterhalten einer Stellkraft ein sicherer Zustand einstellt. Wird bspw. eine Bremse über eine LORENTZ<sup>92</sup>-Kraft elektrisch betätigt, so besteht die robustere Lösung in der Nutzung des *Ruhestromprinzips*. Hierbei wird die *Lorentz Kraft* zum Lösen der Bremse verwendet, der Grundzustand ist geschlossen. Auswirkungen von Schwankungen in der Stromversorgung haben hierdurch keinen Einfluss auf die Funktionserfüllung, das System verfügt über eine Teilfunktionalität bei Ausfall.

Die Verwendung von elastischen Elementen als Puffer bzw. Stoßfänger reduzieren die Lastspitzen bei ungewolltem Zusammenstoß. Die hierdurch entstehenden mechanischen Zusatzbelastungen werden durch das elastische Element klein gehalten. Dies liegt darin begründet, dass Systeme hoher Nachgiebigkeit potentielle Energie über große Verformungen speichern können. Hierbei fallen die maximalen Kräfte im Vergleich zu steifen Systemen gering aus. Kletterseile reduzieren auf diese Art den Fangstoß beim Sturz und begrenzen hierdurch die Wirkung der Reaktionskräfte als Störgröße für den menschlichen Körper.

Verändern Systeme ihren Zustand während der Nutzung, ist dies grundsätzlich durch zusätzliche Prozesse wie Kontrollieren detektierbar. Dies ist jedoch nur möglich, wenn Zustandsänderungen für den Nutzer sichtbar sind. Beispielsweise zeigen Seile ihre Abnutzung optisch an, die Kontrolle einer Kette ist hingegen ungleich aufwendiger, vor allem, wenn sie aus sprödem Werkstoff mit geringer plastischer Verformungsfähigkeit besteht.

Unter Umständen kann das gezielte Aufbringen einer Störgröße in der Produktion das Produkt insensitiv gegenüber ebendieser Störgröße im Betrieb machen. Ein Beispiel hierfür sind spezielle optische Fasern mit Metallüberzug für den Betrieb im Hochtemperaturbereich. Wärmeexposition bei der Herstellung durch Glühen sorgt für eine im Betrieb über Temperaturschwankungen gleichmäßige Leitfähigkeit. Störgrößen können deutlich reduziert werden, wenn das thermodynamisch günstigste physikalische Prinzip für ein technisches Produkt gewählt wird. Beispielsweise führt die Vermeidung von Temperaturdifferenzen im Vergleich mit der Umgebung zu einem geringen Wärmestrom.

<sup>92</sup>Hendrik Antoon Lorentz (\* 18. Juli 1853 in Arnhem; † 4. Februar 1928 in Haarlem) war ein niederländischer Mathematiker und Physiker.

Schwanken die Umgebungsbedingungen sehr stark, ist es meist sinnvoller mehrere Lösungen umzusetzen, als eine Universallösung zu suchen. Die Anzahl der zu ertragenden Störgrößen kann hierdurch gesenkt werden. Gleichzeitig müssen bei der Konstruktion weniger Kompromisse geschlossen werden. Grundsätzlich ist darauf zu achten Geräte vor den wesentlichen Umwelteinflüssen zu schützen. Diese Richtlinie fordert damit die Umsetzung des Prinzips der Abschirmung. Einfache, übersichtliche und narrensichere Bedienung zielt auf die Rolle des Menschen als Störgröße ab. Ein Fehlverhalten des Systems in Folge von menschlichem Versagen sollte vermieden werden. Treten Störsignale auf, kann ein entgegengesetztes Signal die ungewollte Wirkung ausgleichen. Eine weitere Möglichkeit besteht im Filtern von Signalen, wobei Signal und Störsignal hierfür eindeutig unterscheidbar sein müssen.

Häufig befassen sich Entwickler mit der Fähigkeit ihres betrachteten Systems bzw. Teilsystems Störgrößen zu ertragen. Allerdings trägt es ebenfalls zur Robustheit bei die Entstehung von Störgrößen zu vermeiden, so dass Nachbarsysteme erst gar nicht gezwungen sind Maßnahmen zu ihrer Abwehr zu ergreifen. Das Vorsehen struktureller Redundanz als Sicherheitsreserve kann bspw. zu Robustheit in Bezug auf unbeachtete Größen führen, grundsätzlich sollte diese Richtlinie jedoch vermieden werden. Ein unreflektierter, oder aber schlecht begründeter, „Angstzuschlag“ ist zwar häufig anzutreffen, entspricht jedoch nicht dem Anspruch des SFB 805 Unsicherheit zu beherrschen ohne *willkürlich* Ressourcen einzusetzen.

## 8 Evaluation der SmArtSys anhand einer industriellen Anwendung

### 8.1 Herangehensweise an die Evaluation von Entwicklungsmethoden

Das Ziel der Evaluation einer Entwicklungsmethode liegt im *Nachweis ihrer Wirksamkeit*, das bedeutet es muss nachgewiesen werden, welchen Mehrwert die Methodenanwendung im Konstruktionsalltag bietet. Dies führt jedoch zu erheblichen Herausforderungen: Üblicherweise erfolgt der Nachweis der Wirksamkeit über den Vergleich mit *Referenzwerten*. So kann die Wirksamkeit einer analytischen Berechnung im Vergleich mit Experimenten beurteilt werden. In Bezug auf die Anwendung von Konstruktionsmethoden muss entsprechend der Abgleich zwischen einer *Problemlösung mit Methode* und einer *Problemlösung ohne Methode* erfolgen. Dies ist allerdings in der Realität nicht möglich, da die beiden Ereignisse nicht unabhängig voneinander sind. Ein Entwickler, der ein Problem einmal gelöst hat, kann nicht im Anschluss alles wieder vergessen und das Problem noch einmal neu lösen. Zur Evaluation von Entwicklungsmethoden müssen also *verschiedene Entwickler ein Problem* lösen. Dies ist allerdings insofern problematisch, als dass Unterschiede in der Kompetenz der Entwickler einen Vergleich der Ergebnisse erst dann möglich machen, wenn eine sehr große Anzahl von Stichproben zur Verfügung steht, die die Annahme einer im Mittel gleichen Kompetenz aller Entwickler rechtfertigt. Diese Randbedingungen sind zur Absicherung der Ergebnisse dieser Dissertation jedoch nicht herzustellen.

Auf Grund der aufgezeigten Herausforderungen muss eine Herangehensweise gefunden werden, die trotz eines im Rahmen dieser Arbeit sehr geringen Stichprobenumfangs ( $n=1$ ) eine Aussage über die grundsätzliche Wirksamkeit der *SmArtSys* in der *industriellen Anwendung* zulässt. Eine Möglichkeit hierfür besteht darin ein sehr ausgereiftes technisches Produkt, das von ausgewiesenen Experten entwickelt wurde, durch einen Entwickler mit vergleichsweise wenig Erfahrung, jedoch unterstützt durch die *SmArtSys*, überarbeiten und die Ergebnisse durch die Experten beurteilen zu lassen, vgl. Abbildung 8.1. Die Argumentation beruht auf der Annahme, dass der Bearbeiter mit wenig Erfahrung nicht kompetenter als die Fachexperten ist. Kann er die Robustheit des technischen Produktes erhöhen, obwohl bereits viel Entwicklungszeit durch die Experten investiert wurde, kann dies der Methode zugeschrieben werden.

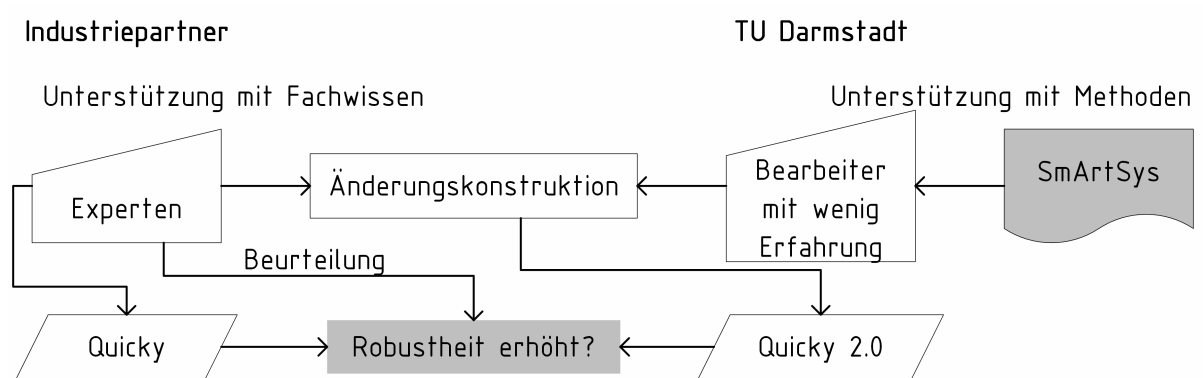
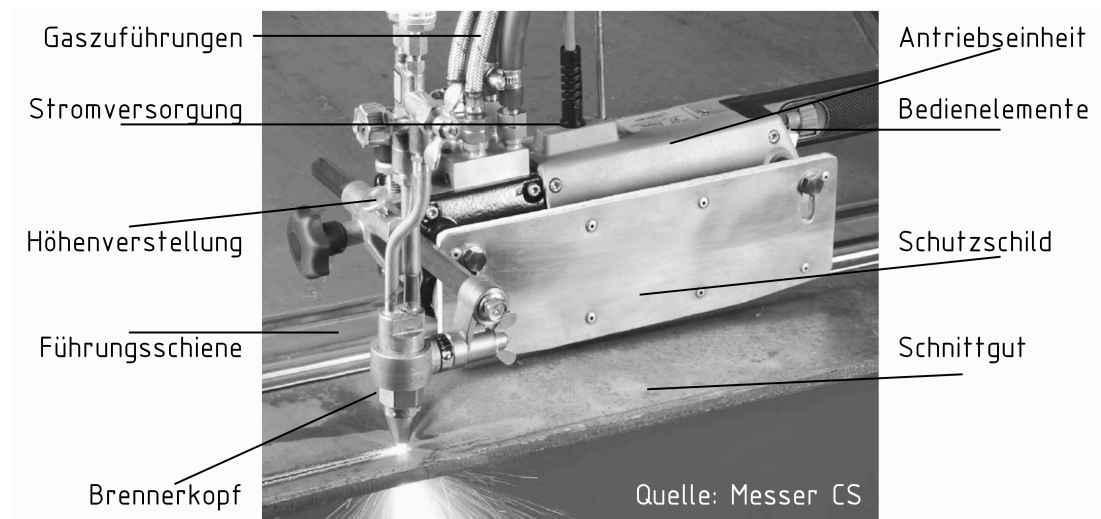


Abbildung 8.1: Evaluationskonzept.

## 8.2 Anwendung der SmArtSys an einer Autogenbrennschneidemaschine

Der Industriepartner, die Firma *Messer Cutting Systems GmbH*, stellt für die metallverarbeitende Industrie *thermische Schneidewerkzeugmaschinen* her. Die zugrundeliegenden Verfahrensprinzipien sind hierbei das *Autogenbrennschneiden*, *Plasmaschneiden* oder *Laserschneiden*. Das angebotene Produktportfolio reicht von kleinen handbetriebenen Maschinen bis zu großen Portalmaschinen, die für großflächige Schneidaufgaben geeignet sind.<sup>1</sup>

Abbildung 8.2: Brennschneidemaschine *Quicky* im Betrieb.

Das zur Evaluation der *SmArtSys* verwendete technische Produkt, die sogenannte *Quicky*,

<sup>1</sup>Quelle: [www.messer-cs.com/de](http://www.messer-cs.com/de)



ist die kleinste Maschine im Sortiment der Firma *Messer CS*. Es handelt sich um eine *handgeführte Autogenbrennschneidemaschine*, die zusätzlich über einen elektrischen Antrieb verfügt, vgl. Abbildung 8.2. Das Gerät wird in der mobilen Metallbearbeitung, z.B. beim Brücken- oder Schiffsbau, unter sehr widrigen Einsatzbedingungen verwendet. Die *Quicky* existiert schon seit über 40 Jahren und wurde stetig weiterentwickelt, pro Jahr werden etwa 100 Stück verkauft. Hoher Kostendruck macht nun eine Überarbeitung notwendig, wobei Robustheit durch das extrem störgrößenbehaftete Arbeitsumfeld der *Quicky* eine besondere Rolle spielt. Außerdem können durch eine insensitiv gegenüber Schwankungen ausgeführte Konstruktion größere Fertigungstoleranzen realisiert werden, was sich positiv auf die Kosten auswirkt.

Abbildung 8.2 zeigt die aktuelle *Quicky* im Betrieb. Das Gehäuse beherbergt die *Antriebseinheit*, die durch einen zusätzlichen *Schutzschild* gegen Schlacke und vor Wärmestrahlung geschützt wird. Die *Bedienelemente* befinden sich an der vorderen Stirnseite des Gehäuses. An der hinteren Seite befindet sich die *Höhenverstellung* für den Brenner, an dem der *Brenner* selbst befestigt wird. Auf der Oberseite befinden sich die *Anschlüsse* für Schneidgas und Brenngas, sowie die Stromversorgung. Die *Quicky* bewegt sich auf 4 Rollen, wobei nur die rechte hintere Rolle angetrieben ist. Es sind *Schnittgeschwindigkeiten* von 100 bis 1000 mm/min. möglich. Die stufenlose Einstellung erfolgt von Hand an einem Drehrad. Die *Nutzungsprozessvarianten* ergeben sich aus der Führung des Schnittes (Freihand, Linear, Kreis) und der Geometrie des Schnittes (Fasenschnitte, senkrechte Trennschnitte).

Im Rahmen der Evaluation werden ausgewählte Ergebnisse aus zwei der drei Gestaltungszonen der *Quicky* vorgestellt, vgl. Abbildung 8.3. Die *Höhenverstellung* hat großen

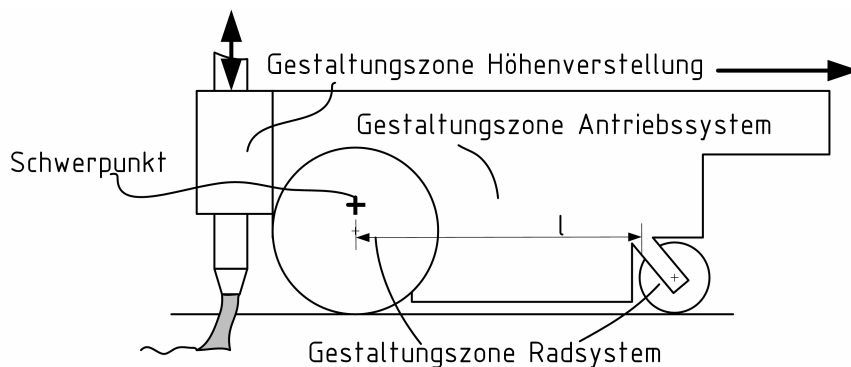


Abbildung 8.3: Gestaltungszonen der *Quicky*.

Einfluss auf die Qualität des Schnittes, da der Abstand zwischen Brenner und Werkstück einstellbar sein, aber während der Nutzung in engen Grenzen konstant bleiben muss. Der *Antriebsstrang* der *Quicky* muss gegen Überlast aus Nutzungsprozessen geschützt werden, so dass er seine Funktion schadungsfrei erfüllen kann.

Zusätzlich müssen die verwendeten Komponenten in Bezug auf Schwankungen in ihren Eigenschaften derart festgelegt werden, dass bestenfalls größere zulässige Toleranzen in

der Komponentenfertigung möglich sind. Das *Radsystem* muss schließlich sowohl die Prozessgröße Vorschubgeschwindigkeit, als auch die Führung der *Quicky* sicherstellen, die beide einen großen Einfluss auf die Schnittqualität haben.<sup>2</sup>

### 8.2.1 Gestaltung des Radsystems mit der SmArtSys

Die Gestaltungszone Radsystem umfasst insgesamt die *Gestaltung der Antriebsräder*, die *Gestaltung der Führungsrollen mit Rollenhalterung und Befestigung am Gehäuse*. An dieser Stelle wird beispielhaft die Anwendung der *SmArtSys* auf die *Arretierung der Führungsrollen* gezeigt, die eine Teilfunktion der Befestigung am Gehäuse darstellt.

Ziel hierbei ist es die Unterstützung der Ideenfindung durch die Anwendung des *RopEx-Kataloges* an einem ganz konkreten Beispiel anhand eines einzigen Konstruktionshinweises aufzuzeigen. Außerdem wird der Zusammenhang zwischen der Anwendung der *SmArtSys* und weiteren Tätigkeiten der Gestaltung wie *Berechnung* und *Experiment* aufgezeigt.

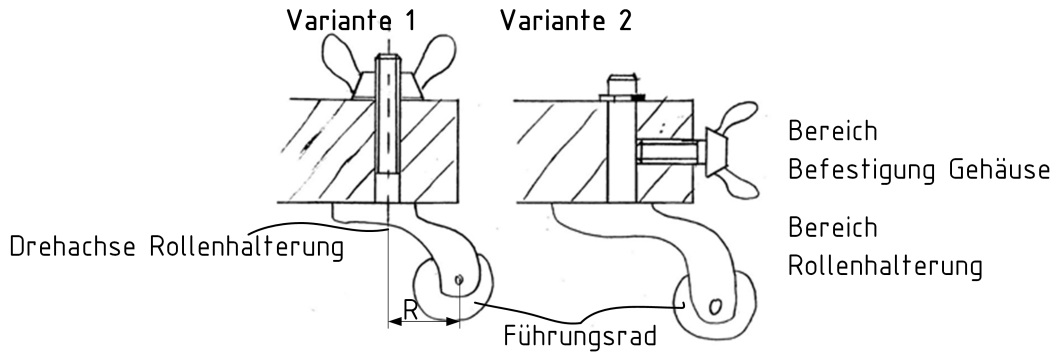
#### Rollenarretierung

Die Führungsrollen müssen sich in der Bearbeitungsebene drehen können, um den Einsatzprozess *Kurvenschnitt* der *Quicky* zu ermöglichen. Hierfür werden die Führungsrollen im Abstand  $R$  vom Drehpunkt angeordnet, vgl. Abbildung 8.4. Während des linearen Schnittes mittels Führungsschiene muss die Verdrehung der Führungsrollen jedoch verhindert werden, damit kein Klemmen durch Verdrehen der Führungsrollen in der Führungsschiene auftritt. Abbildung 8.4 zeigt zwei Lösungsvarianten für die *Rollenarretierung*. Bei Variante 1 wird die Rollenhalterung in eine Durchgangsbohrung im Gehäuse gesteckt und von oben mit einer Flügelmutter verschraubt. Die Drehachse ermöglicht gemeinsam mit der Bohrung die Rotation in der Schnittebene. Ein Absatz an der Drehachse und eine Flügelmutter legen die Drehachse vertikal fest. Zum reibkraftschlüssigen Sperren der Rotation wird die Flügelmutter fest angezogen, vgl. Abbildung 8.4 links. Problematisch an Variante 1 ist die Kopplung von vertikaler Festlegung der Drehachse und Sperrung der Rotation über die Flügelmutter. Variante 2 zeigt einen verbesserten Lösungsvorschlag, bei dem die beiden Teilfunktionen Drehen ermöglichen und Drehen verhindern über unterschiedliche Wirkflächenpaare realisiert werden. Die Drehachse ist sauber geführt in der Durchgangsbohrung, die vertikale Position wird von oben durch einen Sicherungsring erreicht. Für die Arretierung kann von der Seite über eine Flügelmutter mit Gewinde eine Druckkraft auf die Drehachse ausgeübt werden, die zur reibkraftschlüssigen Sperrung der Rotation führt, vgl. Abbildung 8.4 rechts. Aus den Bauraumzwängen der vorgegebenen elektronischen Bauteile erhöht sich die Spurweite der *Quicky 2.0*. Das *Prinzip der Standardisierung* führt auf ein bereits im Produktportfolio der Firma *Messer CS* befindliches Schienensystem, das jedoch ein anderes

---

<sup>2</sup>Vgl. THIELE (2017), S. 20f.

<sup>3</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach THIELE (2017), S. 53.

Abbildung 8.4: Lösungsvarianten für die *Rollenarretierung*.<sup>3</sup>

Schienenprofil aufweist. Die *Grundregel der Einfachheit* führt nun dazu, dass die Auswirkungen der veränderten Schienengeometrie kritisch hinterfragt werden. Aus diesem Grund wird im Detail analysiert, ob ein Klemmen bei veränderter Schienengeometrie überhaupt auftreten kann. Abbildung 8.5 zeigt die Geometriegrößen der Räder in der

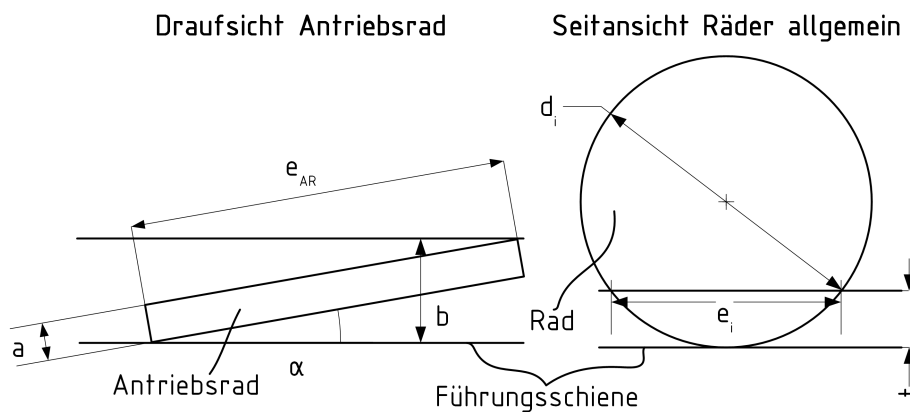


Abbildung 8.5: Geometriegrößen der Räder und der Führungsschiene.

Führungsschiene. Die Strecke  $e_i$  ergibt sich aus dem Durchmesser  $d_i$  der Räder und der Nuttiefe  $t$  der Führungsschiene nach dem Satz des PYTHAGORAS<sup>4</sup> zu

$$e_i = 2 \cdot \sqrt{(d_i t - t^2)}. \quad (8.1)$$

Da die *Antriebsräder* sich in der Werkstückebene nicht relativ zum Gehäuse verdrehen können, führt eine Verdrehung der gesamten *Quicky 2.0* um den Schwerpunkt, vgl. Abbildung 8.3, in der Führungsschiene dazu, dass der Drehpunkt  $B$  der Führungsrollen

<sup>4</sup>*Pythagoras von Samos* (\* um 570 v. Chr. auf Samos; † nach 510 v. Chr. in Metapont) war ein antiker griechischer Philosoph und Mathematiker.

nicht mehr mit der Mitte der Führungsnut liegt, sondern um die Strecke  $x$  senkrecht zur Achse verschoben wird, vgl. Abbildung 8.6. Der Winkel  $\alpha$  lässt sich für das *Antriebsrad* (Index AR), unter Berücksichtigung kleiner Winkel, mit der Nutbreite  $b$  und der Rollendicke  $a$  nach (8.2) berechnen.

$$\alpha \approx \frac{b-a}{e_{AR}} \approx \frac{b-a}{2 \cdot \sqrt{(d_{AR}t - t^2)}}. \quad (8.2)$$

Durch den Abstand  $x$  erhält die Antriebskraft  $F_A$  an der Führungsrolle, die zunächst nur aus der zu überwindenden Wälzreibung der Führungsrolle das Gleichgewicht hält, einen Hebelarm, wodurch die Führungsrolle verdreht wird, bis sie schließlich an den Seiten der Führung anliegt. Der sich einstellende Winkel  $\beta$  ergibt sich analog zu (8.2) unter Verwendung der Geometrie nach Abbildung 8.6 zu

$$\beta \approx \frac{b-a}{e_{FR}} \approx \frac{b-a}{2 \cdot \sqrt{(d_{FR}t - t^2)}}. \quad (8.3)$$

Abbildung 8.6 zeigt die Kräfte am Drehpunkt  $B$ , sowie den seitlichen Kontaktpunkten

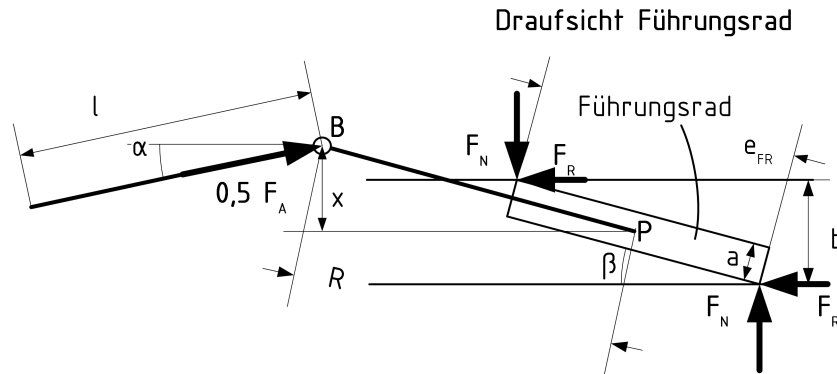


Abbildung 8.6: Geometriegrößen der Führungsräder und der Schiene, sowie Kräfte aus Antrieb und Kontakt zwischen Führungsrad und Wange der Führungsschiene.

zwischen Führungsrad und Schiene. Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung liefert nun

$$\frac{1}{2} \cdot F_A \cdot \cos(\alpha) = 2 \cdot F_R. \quad (8.4)$$

Ein Klemmen liegt demnach vor, sobald die Reibkräfte  $F_R$  in Folge der Schiefstellung  $\beta$  größer als der Anteil der verfügbaren Antriebskraft  $F_A$  am Punkt  $B$  sind. Daraus ergibt sich die Bedingung für die Funktionsfähigkeit nach (8.5).

$$\frac{1}{2} \cdot F_A \cdot \cos(\alpha) > 2 \cdot F_R. \quad (8.5)$$

Das Momentengleichgewicht um Punkt  $P$  liefert

$$\frac{1}{2} \cdot F_A \cdot \cos(\alpha) \cdot R \cdot \sin(\beta) + \frac{1}{2} \cdot F_A \cdot \sin(\alpha) \cdot R \cdot \cos(\beta) - 2 \cdot F_N \left( \frac{e_{FR}}{2} - \frac{a}{2} \cdot \sin(\beta) \right) = 0. \quad (8.6)$$

Zusätzlich gilt das COULOMB-sche Reibgesetz nach (8.7).

$$F_R = \mu_0 \cdot F_N. \quad (8.7)$$

Für kleine Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  schreibt sich das Momentengleichgewicht unter Berücksichtigung von (8.7) zu

$$\frac{1}{2} \cdot F_A \cdot R (\beta + \alpha) - 2 \frac{F_R}{\mu_0 \left( \frac{e_{FR}}{2} - \frac{a}{2} \cdot \beta \right)} = 0. \quad (8.8)$$

Aufgelöst nach  $F_R$  und eingesetzt in (8.4) ergibt sich unter Berücksichtigung kleiner Winkel  $\alpha$  die Bedingung für Klemmen der Führungsrolle in der Führungsschiene nach

$$\frac{R \cdot \mu_0 \cdot (\beta + \alpha)}{2 \left( \frac{e_{FR}}{2} - \frac{a}{2} \cdot \beta \right)} < \frac{1}{2}. \quad (8.9)$$

Unter Verwendung von (8.2) und (8.3) wird (8.9) für den vorliegenden Fall geprüft. Die Werte sind in Tabelle 8.1 hinterlegt. Es ergibt sich

$$0,019 < \frac{1}{2}. \quad (8.10)$$

Ein Klemmen ist also nicht zu erwarten, selbst wenn der Haftreibungskoeffizient  $\mu_0$  sich in

| Größe    | Wert   | Erläuterung   |
|----------|--------|---|
| $\mu_0$  | 0,15   | Haftreibungskoeffizient Stahl auf Stahl             |
| $d_{AR}$ | 65 mm  | Durchmesser Antriebsrad                             |
| $d_{FR}$ | 28 mm  | Durchmesser Führungsrad                             |
| $b$      | 5 mm   | Breite Führungsschiene                              |
| $t$      | 3 mm   | Nuttiefe Führungsschiene                            |
| $a$      | 4 mm   | Radbreite   |
| $R$      | 23 mm  | Abstand Führungsrolle zu Drehlagerpunkt             |
| $l$      | 400 mm | Achsabstand der Führungsräder zu den Antriebsrädern |

Tabelle 8.1: Übersicht relevanter Größen der *Quicky* und der Führungsschiene.

Folge von Schmutz deutlich ändern sollte. Als Konsequenz wird die Rollenarretierung bei der *Quicky 2.0* nicht mehr umgesetzt. Die Umsetzung der *Grundregel der Einfachheit* führt zu einer reduzierten Anzahl an Bauteilen und damit zu einer geringeren Anzahl an schwankenden Objekteigenschaften, die zur Funktionserfüllung beitragen. Die gefundene

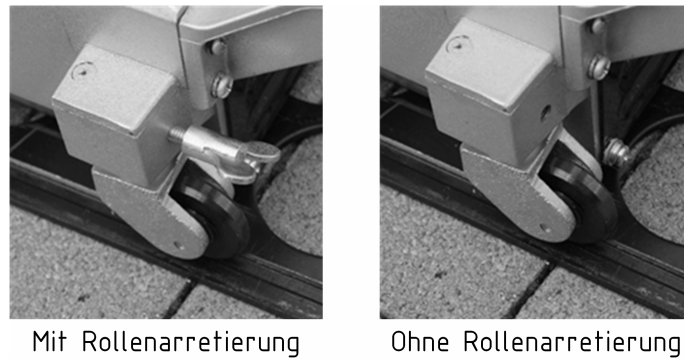


Abbildung 8.7: Experimentelle Absicherung der Ergebnisse in Bezug auf die Rollenarretierung.<sup>5</sup>

Lösung ist also, im Vergleich mit den vorherigen Lösungen, vgl. Abbildung 8.4, sowohl robuster als auch wirtschaftlich attraktiver.

Die Ergebnisse der Berechnung werden von einem Experiment bestätigt, bei dem ein Prototyp mit und ohne Rollenarretierung mehrfach vorwärts und rückwärts in verschiedenen Geschwindigkeiten verfahren wird, vgl. Abbildung 8.7. Klemmeffekte werden hierbei keine beobachtet.

---

<sup>5</sup>Quelle: Angepasste Darstellug nach THIELE (2017), S. 96.

### 8.2.2 Gestaltung der Höhenverstellung mit der SmArtSys

Anhand der Höhenverstellung der *Quicky* soll das iterative Vorgehen der *SmArtSys* unter Verwendung des *RopEx-Kataloges* an einigen Bauteilen illustriert werden. Zusätzlich kann ein Vergleich der Bauteile vor und nach der Anwendung der *SmArtSys* genutzt werden, um die Tauglichkeit der Methodenanwendung aufzuzeigen. Die Dokumentation der insgesamt auf die Gestaltungszone angewendeten Hinweise findet sich in Anhang D.1.1. Ausgangspunkt für die Anwendung der *SmArtSys* auf die Gestaltungszone

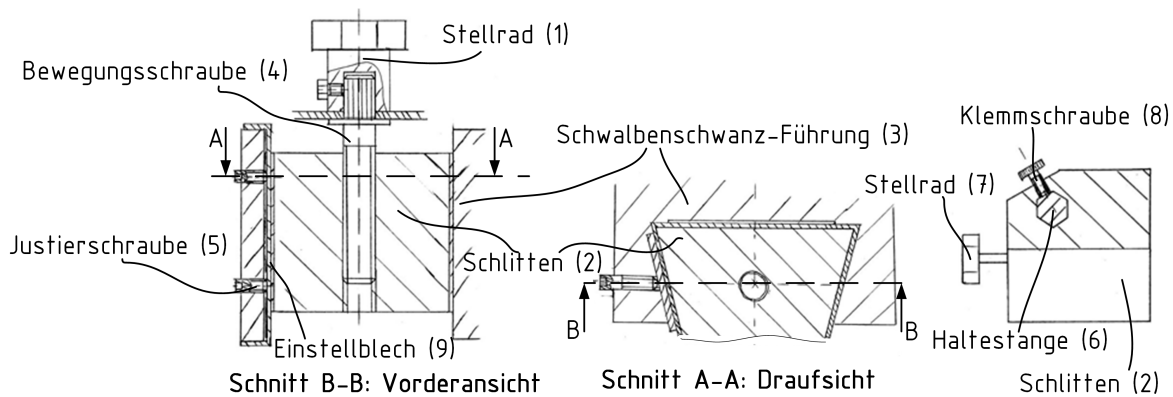


Abbildung 8.8: Höhenverstellung der *Quicky*.<sup>6</sup>

Höhenverstellung ist das Konzept für die *Quicky 2.0*. In diesem Konzept ist vorgesehen die *Schwalbenschwanzführung* von der *Quicky* zu übernehmen. Abbildung 8.8 zeigt Handskizzen der Höhenverstellung. Die Höhenverstellung wird durch Drehen am *Stellrad* (1) betätigt. Eine Drehung bewirkt, dass der *Schlitten* (2) durch die *Bewegungsschraube* (4) in der *Schwalbenschwanzführung* (3) translatorisch in vertikaler Richtung bewegt werden kann. Die spielfreie Einstellung der Schwalbenschwanzführung erfolgt mit Hilfe von zwei *Justierschrauben* (5) und *Einstellblechen* (9) verschiedener Wanddicke. Am Schlitten befindet sich die *Brennerhalterung*, die aus einer in horizontaler Richtung geführten *Haltestange* (6) und einer *Klemmschraube* (8) zur Festlegung der Position der Haltestange besteht. Eingestellt wird die horizontale Position über das *Stellrad* (7), die Kopplung zwischen der Rotation des Stellrades und der Translation der als Sechskant-Vollprofil ausgeführten Haltestange findet über ein *Ritzel-Zahnstangen-Getriebe* statt.

Abbildung 8.9 zeigt den schrittweisen, durch Konstruktionshinweise stimulierten, Weg von der Schwalbenschwanzführung (Start) hin zu einer robusteren Lösungsvariante der Führung (Ziel), wobei immer jeweils der genutzte Konstruktionshinweis und die daraus abgeleitete Lösungsvariante dargestellt sind. Bei nicht weiter verfolgten Lösungsvarianten werden zusätzlich die Gründe angegeben. Die Darstellung fasst in kompakter Weise die Dokumentation der Iterationsschritte des Projektbearbeiters mit wenig Erfahrung

<sup>6</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach Vgl. THIELE (2017), S. 54.

zusammen, wobei auch die jeweils verwendeten Konstruktionshinweise und ihre Interpretation auf dessen Auswahl und Einschätzung beruhen.

Den Startpunkt der *Synthesetätigkeit* stellt die *Schwalbenschwanzführung* dar, die jedoch durch die schrägen Führungsflächen gegen die *Grundregel der Eindeutigkeit* verstößt. Zusätzlich sind die Ist-Positionen des Schlittens in der Führung unter Einbeziehung schwankender Geometrieigenschaften der Bauteile in vertikaler Richtung und in horizontaler Richtung miteinander gekoppelt, die *Schwalbenschwanzführung* verstößt also zusätzlich gegen das Prinzip der Entkopplung. Dies wirkt sich auch auf die Justierschrauben der *Schwalbenschwanzführung* aus. Eine getrennte Einstellung des Führungsspiels in vertikaler und in horizontaler Richtung ist nicht möglich. Damit verstößt die *Schwalbenschwanzführung* gegen den Hinweis *Kompensationsglieder dürfen nicht Teil mehrerer verbundener Toleranzketten sein*. Diese Analyse führt auf die Suche nach Lösungsvarianten von Führungen, bei denen *Eindeutigkeit* gewährleistet ist. Als grundsätzlich geeignet unter den gegebenen Randbedingungen<sup>7</sup> erweisen sich eine *offene Führung* und eine *T-Führung*. Beide Varianten werden weiter konkretisiert und am Schluss einer Bewertung und Auswahl nach VDI 2225<sup>8</sup> unterzogen. An dieser Stelle wird die Synthese der *T-Führung* weiterverfolgt.

Die Führung ist an der Teilfunktion *Position des Brenners sicherstellen* beteiligt, die für die Funktionserfüllung unter Unsicherheit von zentraler Bedeutung ist, da sich Schwankungen in der Positionierung des Brenners direkt auf das Schnittergebnis auswirken. Aus diesem Grund muss die Führung spielfrei sein, weshalb das *Prinzip der Fehlerjustierung* Anwendung findet. Durch Justierschrauben kann die *T-Führung* spielfrei eingestellt werden, wodurch sowohl Geometrieabweichungen aus der Fertigung, als auch eventuelle Veränderungen der Geometrie im Laufe des Nutzungsprozesses ausgeglichen werden können. Durch die in der *T-Führung* angestrebte *Unabhängigkeit der Kompensationsglieder* sind jedoch für jede Einstellungsrichtung jeweils zwei Schrauben notwendig, was die Fertigung zumindest in Bezug auf die Anzahl der Bohrungen und Schrauben aufwendiger und damit kostenintensiver macht.

Auf Basis der Kostennachteile der *T-Führung*, im Vergleich zur *Schwalbenschwanzführung*, wird angestrebt die Auswirkungen der Uneindeutigkeit in der *Schwalbenschwanzführung* durch die Umsetzung des *Prinzips der Fehlerminimierung*, konkret in Form des *Prinzips der Elastizität*, zu reduzieren. Die hieraus entstehende Lösungsvariante sieht eine zusätzliche Elastizität in den Justierelementen vor, die umgesetzt wird indem die Kraftübertragung an den Schlitten von der Justierschraube über eine vorgespannte Schraubenfeder und eine Kugel erfolgt.

Unterstützt wird die Synthese der Lösung durch den Hinweis *Punktkontakte in Bezug auf die Eindeutigkeit des Kontaktes Linien- oder Flächenkontakten vorziehen* und den Hinweis *Spielfreie Führungen elastisch vorspannen*. Die geringere Steifigkeit der Jus-

---

<sup>7</sup>Vgl. THIELE (2017).

<sup>8</sup>Vgl. THIELE (2017), S. 98.

<sup>9</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach THIELE (2017), S. 59-60.



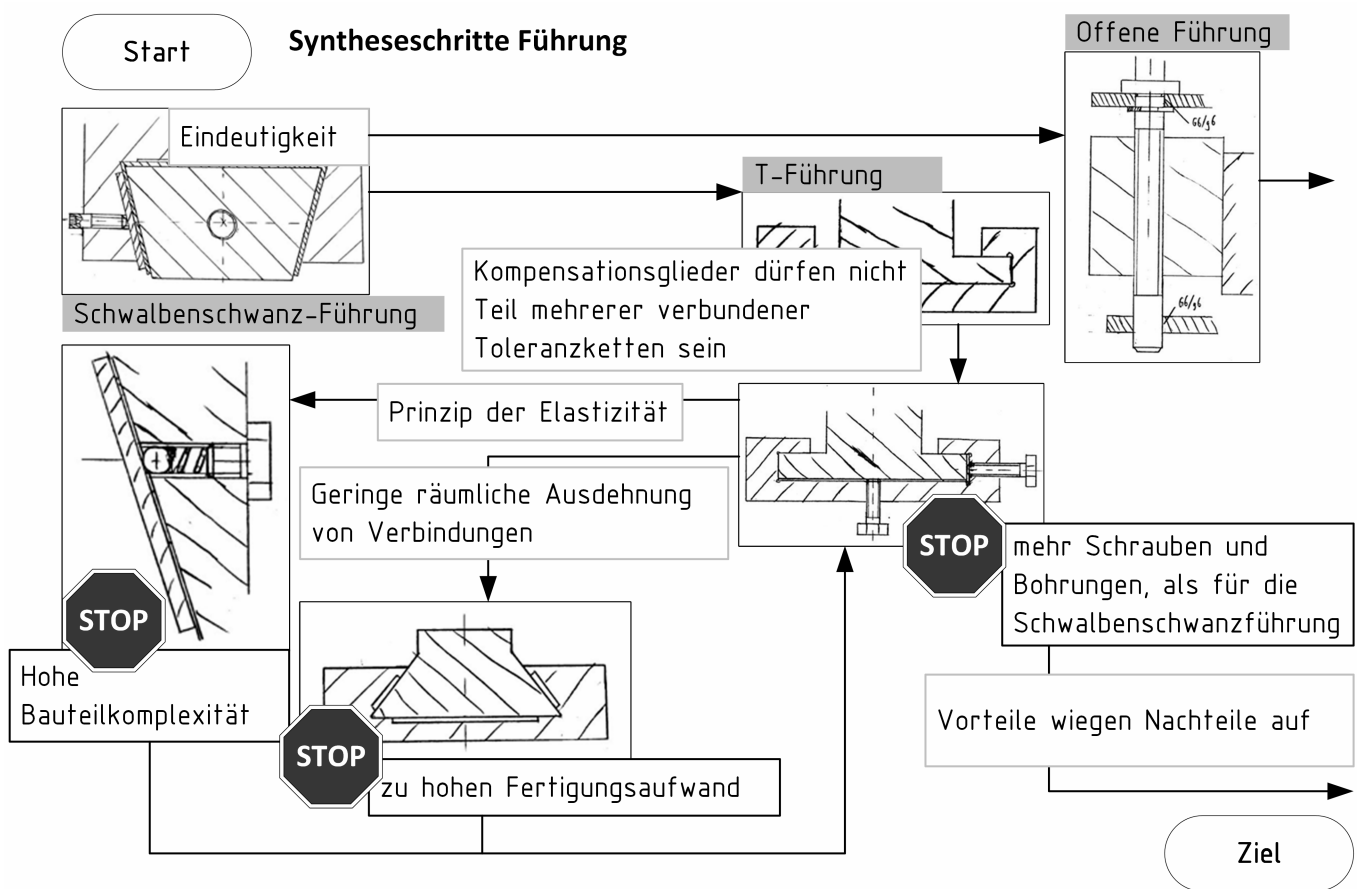


Abbildung 8.9: Beispiel für Iterationsschritte bei der Synthese der Führung.<sup>9</sup>

tiereinheit sorgt nun dafür, dass Schwankungen über der Höhe der Führung nicht zu einem Klemmen der Führung führen. Die Lösungsvariante wird jedoch verworfen, da die Komplexität der Umsetzung insgesamt schwerer wiegt als die durch sie generierbaren Vorteile.

Eine weitere Lösungsvariante zur Verbesserung der *Schwalbenschwanzführung* ergibt sich aus dem *Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen*. Es besagt, dass Verbindungsflächen nur so groß wie nötig ausgeführt sein sollten, um den Einfluss von möglichen Störgrößen zu verringern und gleichzeitig die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Bearbeitung der Flächen in der Fertigung zu verringern. Drei zusätzliche Nuten in den Führungsflächen verringern die Kontaktzone deutlich, allerdings wird durch die Umsetzung des Hinweises in der Schwalbenschwanzführung die Fertigung deutlich aufwendiger, was sich in steigenden Kosten niederschlägt.

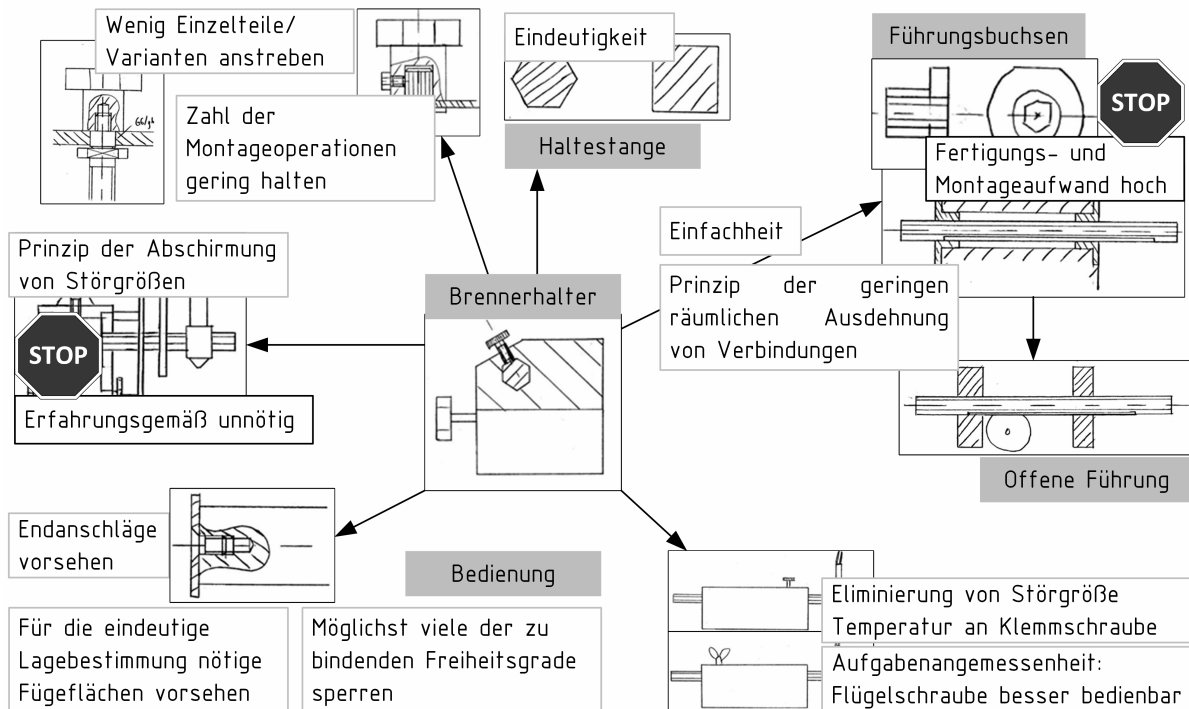
Ausgehend von der existierenden Lösung der Führung in der *Quicky* werden, motiviert durch die Uneindeutigkeit der Lösung, alternative Führungen in Form der *offenen Führung* und der *T-Führung* entwickelt, deren Nachteile jedoch zunächst zu einer Rückkehr zur *Schwalbenschwanzführung* und dem Versuch führen die Auswirkungen der Unsicherheit durch verschiedene Maßnahmen zu verringern. Da dies nicht zufriedenstellend gelöst werden kann, wird die *T-Führung* weiter konkretisiert, die im Vergleich zur verbesserten *Schwalbenschwanzführung* zwar über zwei zusätzliche Schrauben verfügt, aber insgesamt immer noch günstiger herstellbar ist als die *Schwalbenschwanzführung*. Die Vorteile der *T-Führung* wiegen also insgesamt die Nachteile auf.

In analoger Weise erfolgt die Synthese der *Brennerhalterung* auf der Basis der in der *Quicky* umgesetzten und ebenfalls für das Konzept der *Quicky 2.0* vorgesehenen Brennerhalterung in Abbildung 8.8. Der Fokus der in Abbildung 8.10 gezeigten Syntheseschritte liegt jedoch nicht auf den einzelnen Iterationsschleifen, vgl. Abbildung 8.9, sondern soll die Breite der Anwendung der *SmArtSys* anhand einzelner, unterschiedlicher Teilbereiche der *Brennerhalterung* aufzeigen.

Zur horizontalen Führung der *Haltestange* befindet sich im *Schlitten* der *Quicky* eine durchgängige sechskantige Aussparung, die in der Fertigung sehr aufwändig ist. Die *Grundregel der Einfachheit* und das *Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen* führen zunächst auf eine Lösungsvariante des *Schlittens*, bei der im *Schlitten* eine Durchgangsbohrung mit großem Durchmesser erzeugt wird, in die jeweils von der Seite *Führungsbuchsen* eingepresst werden. Hierdurch wird die aufwändige Fertigung der sechskantigen Aussparung über die gesamte Breite des Schlittens vermieden, allerdings wird der Aufwand für die Montage erhöht und der Fertigungsaufwand sinkt insgesamt durch die zusätzlich benötigten *Führungsbuchsen* nicht. Die Lösungsvariante mit *Führungsbuchsen* dient jedoch als Vorlage, um die Lösungsvariante *offene Führung* durch die konsequente Umsetzung der Grundregel der Einfachheit abzuleiten. Die Führungsflächen sind direkt im Schlitten angebracht, der in der Mitte über eine große Aussparung verfügt. Der Schlitten mit offener Führung wird im Rahmen der Entwicklung der *Quicky*

---

<sup>10</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach THIELE (2017), S. 59-60.

Abbildung 8.10: Beispiel für Iterationsschritte bei der Synthese der Führung.<sup>10</sup>

2.0 weiter konkretisiert.

Zur *Höhenverstellung* der *Brennerhalterung* dienen das *Stellrad* (1) und die *Bewegungsschraube* (4) in Abbildung 8.8. Das *Stellrad* ist bisher über eine Rändelung formschlüssig mit der *Bewegungsschraube* verbunden, die die Stellmomente überträgt. Die axiale Festlegung der Bewegungsschraube wird nach oben hin von einem Absatz an der *Bewegungsschraube* realisiert. Den axialen Richtungssinn<sup>11</sup> nach unten legt das *Stellrad* fest, indem es bei der Montage bis zum Anschlag am Gehäuse auf die Bewegungsschraube aufgeschoben wird. Die Position des Stellrades wird dann durch eine Klemmschraube reibkraftschlüssig festgelegt. Problematisch an dieser Lösung ist die Abhängigkeit des axialen Spiels vom Monteur, da keine eindeutige Einbaulage existiert. Zusätzlich kann die Betriebstemperatur in Zusammenhang mit den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und Kunststoff zu einer Verspannung der Höhenverstellung gegen das Gehäuse führen. Die hierdurch entstehende Reibung an der Kontaktfläche zwischen Stellrad und Gehäuse, sowie Wellenabsatz und Gehäuse führt zu einer Schwankung in den Stellkräften. Mit dem Ziel die Montageoperationen und die Anzahl der Einzelteile zu verringern wird eine Lösungsvariante umgesetzt, die zusätzlich dem *Prinzip der Standardisierung* genügt. Die neue Verbindung zwischen Stellrad und Bewegungsschraube

<sup>11</sup>Nach ROTH bezeichnen Richtungssinne Freiheitsgrade unter Berücksichtigung der Bewegungsrichtung. Die 6 Freiheitsgrade im Raum werden daher durch 12 vorzeichenbehaftete Richtungssinne konkretisiert.

besteht aus einer direkten Verschraubung der beiden Teile miteinander. Diese Umsetzung entspricht einer in der Firma *Messer CS* an anderer Stelle eingesetzten Lösung und reduziert durch die geringere Anzahl an Varianten den Verwaltungsaufwand und die Lagerhaltung der Firma. Die Positionierung der beiden Fügepartner erfolgt formschlüssig über einen Absatz in der Bewegungsschraube. Die Zentrierung der Bewegungsschraube zum Gehäuse wird nach dem *Prinzip der Aufgabenteilung* von einer eigenen Wirkfläche umgesetzt. Unterschiedliche Temperatúrausdehnungen sorgen lediglich für eine Schwankung in der elastischen Verspannung zwischen Stellrad und Bewegungsschraube und wirken sich nicht auf die Stellkräfte aus.

Die *Quicky* wird unter sehr rauen Bedingungen eingesetzt. Im Betrieb ist mit Störgrößen in Form von Stäuben, Schlacke und hohen Temperaturen zu rechnen.<sup>12</sup> Das *Prinzip der Abschirmung von Störgrößen* führt auf eine Lösung mit einem zusätzlichen Schutzschild, der die Bedienelemente der Höhenverstellung schützt. Aufgrund von Erfahrungswerten bei der Nutzung der *Quicky* wird die Lösung jedoch verworfen, da es in der Vergangenheit nicht zu Problemen in Folge zu hoher Störgrößeneinwirkung kam.

Die Bedienung der Höhenverstellung erfolgt durch Menschen in rauen Arbeitsumgebungen, was auch einen Schutz der Menschen notwendig macht. Beispielsweise tragen Arbeiter im betrachteten Umfeld häufig feste Handschuhe. Die Bedienung der *Quicky* 2.0 muss diese Eventualitäten berücksichtigen. Das *Prinzip der Aufgabenangemessenheit* führt auf eine veränderte Form der Klemmschraube, vgl. Abbildung 8.8. Die bisher eingesetzte Rändelschraube lässt sich mit Handschuhen nicht gut greifen, die in der *Quicky* 2.0 verwendete Flügelschraube ermöglicht eine im Vergleich verbesserte Bedienung. Zusätzlich wird die Klemmschraube auf der dem Brenner gegenüberliegenden Seite angeordnet, wodurch sie im Betrieb weniger heiß wird. Dies ermöglicht es Arbeitern auch nach längeren Einsatzdauern die Schnittbreite der *Quicky* einzustellen ohne sich die Finger zu verbrennen. Ebenfalls in den Bereich der Bedienung fällt die Veränderung der *Haltestangenengeometrie* am freien Ende. Die Anwendung der Hinweise *möglichst viele der zu bindenden Freiheitsgrade sperren* und *für die eindeutige Lagebestimmung nötige Fügeflächen vorsehen* führt auf die Umsetzung eines Endanschlages, der verhindert dass die Haltestange im Betrieb durch Unaufmerksamkeit versehentlich aus der Führung fallen kann.

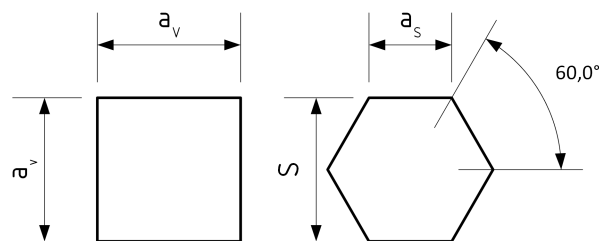


Abbildung 8.11: Geometriegrößen der Haltestangenprofilquerschnitte der *Quicky*.<sup>13</sup>

<sup>12</sup>Vgl. THIELE (2017), S. 21f.

Die Haltestange ist in der *Quicky* als Sechskant-Profil ausgeführt, das gegen die *Grundregel der Eindeutigkeit* verstößt. Die Ausführung als Vierkant-Profil erfüllt ebenfalls die Teilfunktionen *Positionieren* in axialer und horizontaler Richtung, sowie *Kraftleitung*. Um die maximal auftretende Torsionsbeanspruchung  $\tau$  des Profils, vgl. Abbildung 8.12, durch den veränderten Querschnitt nicht zu verändern, muss nach

$$\tau = \frac{M_T}{W_T} \quad (8.11)$$

das Torsionswiderstandsmoment  $W_T$  konstant bleiben.<sup>14</sup>

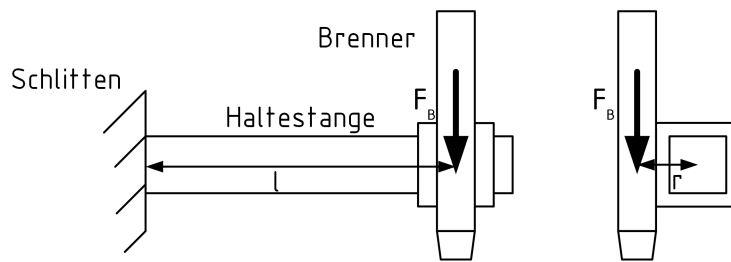


Abbildung 8.12: Querkraftbiegung und Torsion in der Haltestange der *Quicky* in Folge Eigengewicht des Brenners.

Das Widerstandsmoment eines Sechskantquerschnittes  $W_S$ <sup>15</sup> berechnet sich, unter Verwendung der Geometriegrößen in Abbildung 8.11, nach

$$W_S = 0,185 \cdot S^3, \quad (8.12)$$

das Widerstandsmoment des Vierkantquerschnittes  $W_V$ <sup>16</sup> mit gleichen Seitenlängen  $a_V$  ergibt sich zu

$$W_V = 0,203 \cdot a_V^3. \quad (8.13)$$

Gleichsetzen und Umstellen nach  $a_V$  liefert mit der Schlüsselweite  $S = 16 \text{ mm}$

$$a_V = \sqrt[3]{\frac{(0,185 \cdot S^3)}{0,203}} = 15,51 \text{ mm}. \quad (8.14)$$

Durch die Einspannung der Haltestange und der Gewichtskraft des Brenners tritt Querkraftbiegung in der Haltestange auf, vgl. Abbildung 8.12 links. Die Änderung der Abmessungen der Haltestange wirkt sich auf das Flächenmoment zweiter Ordnung  $I$  der

<sup>13</sup>Quelle: Eigene, angepasste Darstellung nach THIELE (2017), S. 61.

<sup>14</sup>Vgl. GROSS ET AL. (2007), S. 179.

<sup>15</sup>Vgl. GROTE und FELDHUSEN (2007), S. C28.

<sup>16</sup>Vgl. GROTE und FELDHUSEN (2007), S. C28.

Haltestange aus. Für das Flächenträgheitsmoment des quadratischen Querschnittes  $I_V$  gilt

$$I_V = \frac{a_V^4}{12} = 4825 \text{ mm}^4, \quad (8.15)$$

während das Flächenträgheitsmoment des sechseckigen  $I_S$  Querschnittes nach

$$I_S = 0,5413 \cdot a_S^4 = 0,5413 \cdot \left( \frac{S}{2 \cdot \sin(60^\circ)} \right)^4 = 3941,6 \text{ mm}^4 \quad (8.16)$$

bestimmt wird.<sup>17</sup> Die durch das Eigengewicht der Brenner verursachte maximale Neigung der Haltestange  $w'_{\max}$  kann auf Basis des mechanischen Ersatzmodells in Abbildung 8.12, dem einseitig fest eingespannten Einfeldbalken, nach Gleichung (8.17) bestimmt werden.<sup>18</sup>

$$w'_{\max}(I) = \frac{F_G \cdot l^2}{2EI}. \quad (8.17)$$

Die Änderung der Neigung durch das veränderte Flächenträgheitsmoment der Haltestange  $I_V$  ergibt sich damit zu

$$\frac{w'_{\max}(I_V)}{w'_{\max}(I_S)} = \frac{I_S}{I_V} = 0,817. \quad (8.18)$$

Durch die vorgenommene Veränderung der Geometrie der Haltestange wird also die Neigung der Brenner in der Ebene senkrecht zur Fahrtrichtung  $w'_{\max}$  um etwa 18 % verringert. Hierdurch haben kleine Abweichungen in den Geometriegrößen der Haltestange einen kleineren Einfluss auf Schwankungen im Betrieb. Damit entspricht die vorgenommene Geometrieänderung zusätzlich der Umsetzung des *Prinzips der Fehlerminimierung*.

Abbildung 8.13 zeigt Handskizzen der kompletten Gestaltungszone *Höhenverstellung* nach der Anwendung der *SmArtSys*. Die Führung ist als *T-Führung* umgesetzt, wobei eine spielfreie Einstellung durch die entkoppelten Justierschrauben in zwei Richtungen erfolgt, Fertigungstoleranzen können so kompensiert werden, wobei gleichzeitig die zulässigen Fertigungstoleranzen der Führung und des Schlittens höher ausfallen als bei der *Schwalbenschwanzführung*. Die T-Führung ist also robuster gegenüber Unsicherheit aus der Fertigung, die getroffenen Maßnahmen ermöglichen eine günstigere Fertigung bei gleicher Funktionserfüllung. Der Schlitten ist zur Führung der viereckigen Haltestange offen ausgeführt, was die Fertigung vereinfacht. Dies wird zusätzlich durch den viereckigen Querschnitt der Haltestange unterstützt, der durch die Eindeutigkeit in der Festlegung seiner Lage relativ zum Schlitten größere Fertigungstoleranzen ermöglicht. Die veränderte Haltestange führt zusätzlich zu einer geringeren Durchbiegung in Folge von Eigengewicht der Brenner, was sich positiv auf die Schnittqualität auswirkt. Die

---

<sup>17</sup>Vgl. GROTE und FELDHOUSEN (2007), S. C14.

<sup>18</sup>Vgl. GROSS ET AL. (2007), S. 125.

<sup>19</sup>Quelle: Angepasste Darstellung nach THIELE (2017), S. 59-60.

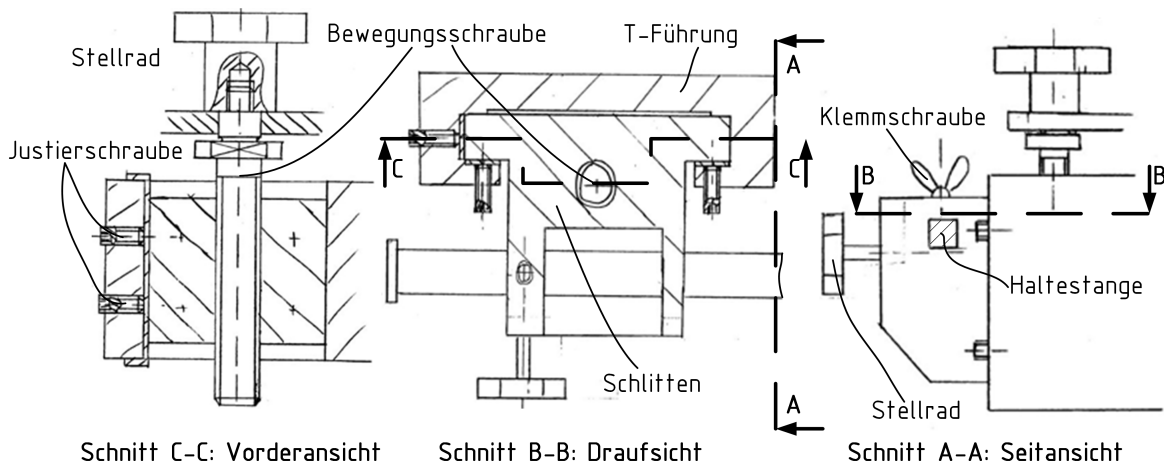


Abbildung 8.13: Höhenverstellung der *Quicky 2.0* nach der Anwendung der *SmArtSys*.<sup>19</sup>

Ausführung der Bedienelemente ermöglicht insgesamt eine Bedienung mit Handschuhen, was die Fehlerwahrscheinlichkeit in der Interaktion mit dem Menschen verringert. Das Stellrad zur Höhenverstellung ist in seiner Funktionsweise unabhängig von Wärme-dehnungsunterschieden zwischen Bewegungsschraube und Stellrad. Außerdem wird eine unternehmensweite Gleichteilestrategie umgesetzt.

## 8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Projektbericht des unerfahrenen Bearbeiters werden die Ergebnisse der Anwendung der *SmArtSys* auf die *Quicky* reflektiert:<sup>20</sup>

Die Robustheit der Brennschneidemaschine wird sowohl für den Herstellungs- als auch für den Nutzungsprozess untersucht. [Antriebssystem, Radsystem, Höhenverstellung] werden anhand von robustheitsförderlichen Konstruktionshinweisen analysiert und falls möglich optimiert. Mit der von FREUND vorgeschlagenen Vorgehensweise kann nachweislich die Anzahl von umgesetzten Hinweisen erhöht werden.

[...]

Die Herausforderung, die Robustheit einer Brennschneidemaschine zu erhöhen, welche schon seit über 40 Jahren existiert, ist sehr groß, da viele erfahrene Konstrukteure bereits an Verbesserungen beteiligt sind. Trotzdem werden durch die robustheitsförderliche Methodik [...] die [zulässigen] Toleranzen der Parameter für die Prozessqualität [...] verringert und gegen Störgrößen unempfindlicher gemacht.

[...]

<sup>20</sup>THIELE (2017), S. 116f.

Die Änderung des Querschnittsprofils der Haltestange zum Vierkant hat beispielsweise eine Verringerung der Rechtwinkligkeits- oder Neigungstoleranz [...] im Schnittgut zur Folge. Die Quicky wird damit robuster gegen die Schwankungen des Brennergewichts und des Abstandes zwischen der Quicky und den Brennern gemacht.

[...]

Auch die Funktionssicherheit der Brennschneidemaschine wird durch die RD Methodik erhöht. Die Unsicherheiten der Maße der vorgespannten Feder, der Bolzen und der Kegelbohrungen haben nach der Synthese wesentlich geringere Auswirkungen auf die Funktionssicherheit der Sperrkörper-Sicherheitskupplung.

[...]

In vielen Anwendungsfällen hat sich durch [die SmArtSys] auch die Fertigung und die Montage der Gestaltungsbereiche vereinfacht. Zum Beispiel verringert das Weglassen der Rollnarretierung die Anzahl der Fertigungs- und Montageschritte der Quicky, ohne negativen Einfluss auf die Prozessqualität. Eine Vereinfachung von Fertigung und Montage hat die Verringerung der Anzahl von Eigenschaften und damit eine Erhöhung der Robustheit zur Folge.

Die durch den unerfahrenen Bearbeiter unter Verwendung der *SmArtSys* erstellten Ergebnisse des Projektes werden gemäß Abbildung 8.1 von Fachexperten bewertet, um eine Aussage über die Wirksamkeit des Ansatzes treffen zu können:<sup>21</sup>

Die Befragung ergibt, dass die *Quicky* bereits eine sehr hohe Robustheit besitzt, was auf das hohe Produktalter der Quicky zurückzuführen ist. Seit über 40 Jahren werden an der Brennschneidemaschine Erfahrungen gesammelt und Änderungen eingebracht und eine weitere Erhöhung der Robustheit ist schwierig. Dennoch führt das DfR an der Quicky zu einer Reduzierung der Bauteilanzahl und damit zu einer Erhöhung der Robustheit, sowohl im Nutzungsprozess, als auch im Herstellungsprozess. Die Vereinfachung der Fertigung und der Montage aller Gestaltungsbereiche durch das DfR wird vom Experten bestätigt. Bei der Montage werden Fehler reduziert und Nachbearbeitungsprozesse gespart. Die Anwendung von robustheitsförderlichen Konstruktionshinweisen stellt besonders für Ingenieure mit wenig Konstruktionserfahrung eine gute Herangehensweise dar.

Als problematisch wird hingegen der zeitliche Aufwand der Methodik betrachtet.

Der durch die *SmArtSys* unterstützte unerfahrene Bearbeiter konnte also ein, seit 40 Jahren kontinuierlich von Fachleuten weiterentwickeltes technisches Produkt, noch ein

---

<sup>21</sup>Vgl. THIELE (2017), S. 119.



Stück weiter verbessern. Dieses Ergebnis wird, unter Berücksichtigung der in Abschnitt 8.1 thematisierten Unsicherheit bei der Evaluation von Entwicklungsmethoden, als Erfolg für die *SmArtSys* gewertet.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Unsicherheit in technischen Systemen führt, bspw. in Form von Rückrufen, zu erheblichen Kosten. Zusätzlich kann Unsicherheit zu unvorhersehbarem Verhalten technischer Systeme bis hin zum totalen Versagen führen, wodurch unter Umständen auch eine erhebliche Gefährdung des Menschen möglich ist. Ein üblicher Weg zur Vermeidung dieser Unglücke ist die Überdimensionierung von Systemen. Allerdings führt diese Maßnahme zu höherem Ressourceneinsatz, sowohl in Bezug auf die verwendete Materialmenge als auch, vor allem bei bewegten Systemen, in Bezug auf Betriebsstoffe. Die Beherrschung von Unsicherheit ist also von großer wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Relevanz.

Bisherige Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit konzentrieren sich auf spätere Phasen in der Produktentwicklung und basieren meist auf stochastischen Verfahren zur Quantifizierung der Robustheit und der Optimierung von bereits festgelegten Bauteilgeometrien unter Berücksichtigung von Schwankungen. Bedarf besteht besonders in Form von qualitativen Methoden, die bereits in früheren Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden können. Mit den Arbeiten im *SFB 805* liegt hierfür bereits eine Methodik zur Analyse von Unsicherheit vor<sup>1</sup>, es fehlt jedoch ein geeignetes Vorgehen, um robuste Produktlösungen zu synthetisieren. Eine vielversprechende Möglichkeit hierfür stellt die Anwendung von Konstruktionshinweisen dar, da diese sowohl früh einsetzbar sind, als auch ein qualitatives Vorgehen ermöglichen. Die bisherigen Ansätze beschränken sich jedoch entweder auf sehr wenige, spezielle Robust Design-Hinweise, oder bezeichnen alle existierenden Konstruktionshinweise als für das Robust Design geeignet. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher die Tauglichkeit einer großen Anzahl allgemeiner Konstruktionshinweise für die Beherrschung von Unsicherheit zu untersuchen. Die identifizierten RD-tauglichen Konstruktionshinweise können dann in Form einer Methode für die Produktentwicklung zugänglich gemacht werden.

Unsicherheit tritt in allen Lebenslaufprozessen des technischen Produktes auf, entsprechend muss eine Beherrschung von Unsicherheit ebenfalls alle Lebenslaufprozesse miteinbeziehen. In der vorliegenden Arbeit werden daher das Unsicherheitsverständnis des *SFB 805* mit der *Theorie technischer Systeme* und der *Eigenschaftstheorie* in Zusammenhang gebracht. Eine durchgängige, formalisierte Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Unsicherheit, Prozessen und technischem Produkt wird hierdurch möglich. Ein zentrales Ergebnis der Arbeit stellt das *Modell technischer Systeme* dar. Es erfasst Unsicherheit in Zusammenhang mit Prozessen in Form von Schwankungen in prozessbeschreibenden Parametern und in Objekteigenschaften. Das technische Produkt als physisches

---

<sup>1</sup>Vgl. ENGELHARDT (2012).

---

Objekt wird in der Fertigung und Montage erzeugt, wobei seine Eigenschaften in individueller Ausprägung festgelegt werden. Hierbei führt Unsicherheit in der Produktion zu Schwankungen in den Produkteigenschaften. In der Nutzungsphase erfüllt das technische Produkt einen Zweck, der in der Herbeiführung von Zustandsänderungen anderer Objekte besteht. Diese Funktion des technischen Produktes ist abhängig von der individuell ausgeprägten Unsicherheit in den Produkteigenschaften. Zusätzlich ist auch die Nutzungsphase unsicher, was sich in zusätzlichen Schwankungen der Eigenschaften des technischen Produktes zeigt. Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit müssen also sowohl die Prozesse der Produktion, als auch die Nutzungsprozesse betreffen.

Das Modell technischer Systeme bietet die Möglichkeit verschiedene bekannte Wirkungsweisen von Robust Design-Maßnahmen zu konsolidieren und systematisiert zu erfassen. Die elf im Rahmen dieser Arbeit identifizierten RD-Wirkungsweisen werden als Einstufungskriterien zur Beurteilung allgemeiner Konstruktionshinweise eingesetzt. Eine Priorisierung der verschiedenen Wirkungsweisen untereinander wird über eine Leitlinie unterstützt. Dabei werden Maßnahmen bevorzugt, die die Auswirkung von Unsicherheit produktseitig reduzieren, oder bestenfalls vollständige Unabhängigkeit des Produktes von Schwankungen erzeugen. Am wenigsten priorisiert werden Maßnahmen, die die Unsicherheit selber beschränken, indem beispielsweise eine hohe Prozessfähigkeit in der Fertigung umgesetzt wird.

Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche in der allgemeinen konstruktionswissenschaftlichen Literatur und der Robust Design-Literatur werden insgesamt etwa 1400 allgemeine Konstruktionshinweise identifiziert, die nach Lebenslaufphasen und Konkretisierungsgrad klassifiziert dokumentiert werden. Mit Hilfe der RD-Wirkungsweisen erfolgt eine Beurteilung der RD-Tauglichkeit der allgemeinen Konstruktionshinweise. Die Einstufung erfolgt qualitativ durch zwei verschiedene Personen, um die Unsicherheit bei der Einstufung zu verringern. Nach Zusammenfassen redundanter Hinweise verbleiben insgesamt etwa 450 RD-taugliche Konstruktionshinweise, die im sogenannten *RopEx-Katalog* dokumentiert sind.

Auf Basis der vorhandenen Vorgehensmodelle zum taktischen Gestalten und für die Anwendung von Konstruktionsrichtlinien im Robust Design kann der *RopEx-Katalog* zur Synthese robuster technischer Systeme verwendet werden. Die Methode, bestehend aus dem Modell technischer Systeme, dem Vorgehensmodell und dem *RopEx-Katalog*, wird unter dem Akronym *SmArtSys* zusammengefasst. Die Anwendung an einem Demonstrator des *SFB 805* zeigt die grundsätzliche Wirksamkeit der Methode auf, indem eine Analyse-Synthese-Schleife für einen Konstruktionshinweise durchlaufen wird. Ein Evaluationsprojekt im industriellen Umfeld untersucht die Wirksamkeit der *SmArtSys* im realen Konstruktionsalltag. Die Ergebnisse des Projektes bestätigen die Wirksamkeit der *SmArtSys*, zeigen jedoch auch den weiteren Handlungsbedarf auf. Der erhebliche Aufwand zur Anwendung der *SmArtSys* ist aus industrieller Perspektive der Hauptkritikpunkt an der Methode. Dem entgegen steht, dass die Versuchsperson in der Evaluation alle Konstruktionshinweise zunächst verstehen musste, da es sich um eine erstmalige Anwendung handelte. Sind die zu beachtenden Konstruktionshinweise erst bekannt, ist eine

deutliche Reduzierung des zeitlichen Aufwandes zu erwarten. Nichtsdestotrotz lässt sich schon aus dem Verständnis von Unsicherheit nach Definition 2.2.1 ableiten, dass Unsicherheitsbeherrschung mit dem Beseitigen von Informationsmangel einhergeht. Entsprechend ist ein gewisser Mehraufwand unvermeidlich.

Forschungsbedarf besteht in Bezug auf die Dokumentation und Darstellung der Konstruktionshinweise. Der bisher verwendete Katalog ist im Arbeitsalltag umständlich und zu wenig spezifisch. Eine elektronische Datenbank, die kontextspezifisch geeignete Konstruktionshinweise *identifizieren* und in geeigneter Form *darstellen* kann, sind der folgerichtig nächste Schritt zur Steigerung der Usability der *SmArtSys*. Hierfür müssen jedoch zunächst die Grundlagen geschaffen werden, um die kontextspezifische Identifizierung zu ermöglichen. Längerfristig betrachtet könnten die Ergebnisse des *Teilprojektes A5* des *SFB 805 - Informationsmodell zur Repräsentation und Visualisierung von Unsicherheiten* genutzt werden, um eine Ontologie aufzubauen, die für wage formulierte Gestaltungsprobleme die am besten passenden Konstruktionshinweise identifiziert. Der *RopEx-Katalog* kann hierfür als Grundlage dienen. Großes Potential sieht der Autor in der Integration der *SmArtSys* in bestehende 3D-CAD-Systeme.

# A Bei der Literaturrecherche berücksichtigte Werke

Tabelle A.1: Berücksichtigte Literatur. Werke, denen Konstruktionshinweise entnommen wurden, sind mit Haken gekennzeichnet. Werke, die nicht verfügbar waren sind mit 0 gekennzeichnet.

| ✓ | Werk  |
|---|---|
|   | <b>A. ALBERS ET AL. (2004):</b> „Principles for Design on the abstract Level of the Contact & Channel Model“. In: <i>Tools and methods of competitive engineering</i> . Hrsg. von I. HORVÁTH. Rotterdam: Millpress, S. 87–94  |
|   | <b>A. ALBERS ET AL. (2013):</b> „Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse – Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact and Channel Model“. In:  |
|   | <b>A. ALBERS ET AL. (2003):</b> „An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems“. In: <i>Research for practice - innovation in products, processes and organisations</i> . Hrsg. von A. FOLKESON ET AL. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 147–148 |
|   | <b>C. ALEXANDER ET AL. (1968):</b> <i>A pattern language: Towns, buildings, construction</i> . 36. print. Bd. 2. Center for Environmental Structure series. New York, NY: Oxford Univ. Press  |
|   | <b>G. S. ALTSCHULLER (1998):</b> <i>Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme</i> . Limitierter Nachdr. der 2. Aufl. Verl Technik. Cottbus: PI - Planung und Innovation   |
|   | <b>P. ANDERSSON (1996a):</b> <i>A process approach to robust design in early engineering design phases</i> . Bd. 8. Lund: Dept. of Machine Design, Lund Institute of Technology [Institutionen för maskinkonstruktion, Lunds tekniska högsk.]   |
| ✓ | <b>P. ANDERSSON (1997a):</b> „On Robust Design in the Conceptual Design Phase: A Qualitative Approach“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 8.1, S. 75–89  |
| 0 | <b>M. M. ANDREASEN ET AL. (1988):</b> <i>Design for assembly</i> . 2. ed., with additional material by K. G. Swift. Bedford: IFS-Publ   |

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
| ✓ | <b>H. A. ARAFA (2006):</b> „Mechanical Design Pitfalls“. In: <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science</i> 220.6, S. 887–899                       |
| ✓ | <b>M. ARVIDSSON und I. GREMYR (2008):</b> „Principles of robust design methodology“. In: <i>Quality and Reliability Engineering International</i> 24.1, S. 23–35  |
|   | <b>M. F. ASHBY (2004):</b> <i>Materials selection in mechanical design</i> . 2. ed., reprinted. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann   |
|   | <b>B. BERTSCHE (2008):</b> <i>Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability</i> . VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg           |
|   | <b>P. BLAKAJ (2014):</b> „Entwicklung robuster Schnittstellen am Beispiel des SFB 805 Demonstrators“. BT. Darmstadt   |
| 0 | <b>D. L. BLANDING (1992):</b> <i>Principles of Exact Constraint Mechanical Design</i> . Rochester, New York: Eastman Kodak Company  |
| 0 | <b>D. L. BLANDING (1999):</b> <i>Exact constraint: machine design using kinematic principles</i> . New York, NY: ASME Press   |
|   | <b>L. T. BLESSING und A. CHAKRABARTI, Hrsg. (2009):</b> <i>DRM, a Design Research Methodology</i> . Hrsg. von L. T. BLESSING und A. CHAKRABARTI. London: Springer London  |
|   | <b>E. BODE (1991):</b> <i>Konstruktions-Atlas: Werkstoff- und verfahrensgerecht konstruieren</i> . Darmstadt: Hoppenstedt   |
|   | <b>G. BOOTHROYD ET AL. (2011):</b> <i>Product design for manufacture and assembly</i> . 3rd edition. Bd. 74. Manufacturing engineering and materials processing. Boca Raton, London und New York: CRC Press           |
| 0 | <b>J. G. BRALLA, Hrsg. (1999):</b> <i>Design for manufacturability handbook</i> . Hrsg. von J. G. BRALLA. 2. ed. McGraw-Hill Handbooks. London: McGraw-Hill   |
|   | <b>A. CHAKRABARTI, Hrsg. (2002):</b> <i>Engineering Design Synthesis: Understanding, Approaches and Tools</i> . Hrsg. von A. CHAKRABARTI. London: Springer  |
|   | <b>K. W. CHASE und A. R. PARKINSON (1991):</b> „A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies“. In: <i>Research in Engineering Design</i> 3.1, S. 23–37, 23–37 |
| 0 | <b>D. CLAUSING und V. FEY (2004):</b> <i>Effective innovation</i> . New York, N.Y. (ASME, Three Park Avenue. New York, NY 10016): American Society of Mechanical Engineers  |
| ✓ | <b>D. CLAUSING und D. D. FREY (2005):</b> „Improving system reliability by failure-mode avoidance including four concept design strategies“. In: <i>Systems Engineering</i> 8.3, S. 245–261                           |

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>S. S. CONDOOR und E. KROLL (2008a):</b> „Using Prametar Analysis for Incorporating Design Principles during Conceptual Design“. In: <i>Proceedings of the 10th International Design Conference Design 2008, May 19 - 22, 2008, Cavtat - Dubrovnik, Croatia</i> . Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 9–18 |
|   | <b>S. S. CONDOOR und E. KROLL (2008b):</b> „Parameter analysis for the application of the principle of direct and short transmission path: A valve-actuator design case study“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 19.4, S. 337–357   |
| ✓ | <b>K.-J. CONRAD (2004):</b> <i>Konstruktion und Gestaltung</i> . In: <i>Conrad, K.-J. Taschenbuch der Konstruktionstechnik. Mit Tabellen</i> . München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag  |
| ✓ | <b>K.-J. CONRAD (2013):</b> <i>Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik</i> . 6. aktualisierte und erw. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag  |
|   | <b>S. R. DALY ET AL. (2010):</b> „Cognitive Heuristic Use In Engineering Design Ideation“. In: <i>2010 Annual Conference &amp; Exposition</i> , S. 15.282.1–15.282.25   |
|   | <b>S. R. DALY ET AL. (2012):</b> „Design Heuristics in Engineering Concept Generation“. In: <i>Journal of Engineering Education</i> 101.4, S. 601–629   |
|   | <b>DIN EN ISO 9241-12 (2000):</b> <i>Ergonomische Anforderung für Büro-tätigkeiten mit Bildschirmgeräten- Teil 12: Informationsdarstellung</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH  |
| ✓ | <b>DIN EN ISO 9241-110 (2008):</b> <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH   |
|   | <b>DIN EN ISO 9241-20 (2009):</b> <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 20: Leitlinien für die Zugänglichkeit der Geräte und Dienste in der Informations- und Kommunikationstechnologie</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH   |
| ✓ | <b>DIN EN ISO 9241-112 (2015):</b> <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH  |
|   | <b>DIN EN ISO 6385 (2016):</b> <i>Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH   |
|   | <b>DIN EN ISO 9241-11 (2017):</b> <i>Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte</i> . Berlin: Beuth Verlag GmbH  |
| ✓ | <b>K. DOWNEY ET AL. (2003):</b> „An introduction to smart assemblies for robust design“. In: 14.4, S. 236–246   |

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>M. EBRO CHRISTENSEN (2015):</b> „Applying Robust Design in an Industrial Context“. Diss. Lyngby: Technical University of Denmark   |
| ✓ | <b>M. EBRO und T. J. HOWARD (2016):</b> „Robust design principles for reducing variation in functional performance“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 27.1-3, 75–92, Seitenangaben im Text beziehen sich auf die Dissertation Ebro 2015                       |
| ✓ | <b>M. EBRO ET AL. (2012):</b> „The Foundation for Robust Design: Enabling Robustness through Kinematic Design and Design Clarity“. In: <i>DESIGN 2012</i> . Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. DS. Zagreb: Fac. of Mechanical Engineering and Naval Architecture, S. 817–826    |
|   | <b>W. E. EDER (1996):</b> „Product Development and Engineering Design Need Education for Processes“. In: <i>Third International Symposium on Product Development in Engineering Education</i> . Halmstad, S. 113–122  |
| ✓ | <b>K. EHRENSPIEL ET AL. (2014):</b> <i>Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung</i> . 7. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg   |
| ✓ | <b>K. EHRENSPIEL und H. MEERKAMM (2013):</b> <i>Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit</i> . 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser                            |
|   | <b>T. EIFLER (2014):</b> „Modellgestützte Methodik zur systematischen Analyse von Unsicherheit im Lebenslauf technischer Systeme“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt  |
|   | <b>R. A. ENGELHARDT (2012):</b> „Uncertainty Mode an Effects Analysis - heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt                    |
|   | <b>C. ERZ (2016):</b> „Analyse allgemeiner Gestaltungsregeln hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Baureihenentwicklung und Erweiterung um skalierungsspezifische Aussagen“. BT. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt  |
| ✓ | <b>J. FELDHUSEN ET AL., Hrsg. (2013):</b> <i>Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung</i> . Hrsg. von J. FELDHUSEN ET AL. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg und Springer Vieweg |
| ✓ | <b>J. FELDHUSEN ET AL. (2014):</b> „Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens“. In: <i>Dubbel</i> . Hrsg. von K.-H. GROTE und J. FELDHUSEN. Berlin: Springer, S. 360–396  |



|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>I. FERRER ET AL. (2009):</b> „An approach to integrate manufacturing process information in part design phases“. In: <i>Journal of Materials Processing Technology</i> 209.4, S. 2085–2091   |
|   | <b>S. FINGER und J. R. DIXON (1989a):</b> „A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes“. In: <i>Research in Engineering Design</i> 1.1, S. 51–67  |
|   | <b>S. FINGER und J. R. DIXON (1989b):</b> „A review of research in mechanical engineering design. Part II: Representations, analysis, and design for the life cycle“. In: <i>Research in Engineering Design</i> 1.2, S. 121–137   |
| 0 | <b>A. FOLKESON ET AL., Hrsg. (2003):</b> <i>Research for practice - innovation in products, processes and organisations: ICED 03, 14th International Conference on Engineering Design ; 19 - 21 August 2003, The Royal Institute of Technology, Stockholm</i> . Hrsg. von A. FOLKESON ET AL. Bd. 31. DS / Design Society. Glasgow: Design Society |
| 0 | <b>R. FORD und P. BARKAN (1995):</b> <i>Beyond Parameter Design - A Methodology Addressing Product Robustness at the Concept Formation Stage</i> . ASME (DE-Vol.81)   |
| ✓ | <b>A. KRÜGER ET AL. (2016):</b> <i>HMI-Tage im Herbst</i>   |
| ✓ | <b>N. FREI (2002):</b> „Der Konstruktionsprozess: Wirkmodelle basierend auf Constraints“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich   |
| ✓ | <b>M. J. FRENCH (1992a):</b> <i>Form, structure and mechanism</i> . Houndmills: MacMillan   |
|   | <b>M. J. FRENCH (1992b):</b> „The opportunistic route and the role of design principles“. In: <i>Research in Engineering Design</i> 4.3, S. 185–190   |
| 0 | <b>M. J. FRENCH (1993):</b> „The nature, use and teaching of design principles“. In: <i>International Journal of Mechanical Engineering Education</i> 21, S. 241–255  |
| ✓ | <b>M. J. FRENCH (1994):</b> „An annotated list of design principles“. In: <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture</i> 208, S. 229–234   |
| ✓ | <b>M. J. FRENCH (1999):</b> <i>Conceptual design for engineers</i> . 3. ed. London: Springer  |
|   | <b>T. FREUND ET AL. (2015a):</b> „An Approach to analysing Interface Uncertainty using the Contact and Channel Model“. In: <i>Design for life</i> . Hrsg. von C. WEBER ET AL. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 53–62  |
|   | <b>T. FREUND ET AL. (2015b):</b> „An Approach to Using Elemental Interfaces to Assess Design Clarity“. In: <i>Applied Mechanics and Materials</i> 807, S. 109–117   |

|   |  |
|---|--|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>  |
|   | <b>K. K. FU ET AL. (2016):</b> „Design Principles: The Foundation of Design“. In: <i>Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2015</i> . New York, N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, V007T06A034 |
|   | <b>E. GAMMA und D. RIEHLE (2011):</b> <i>Entwurfsmuster: Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software</i> . [6. Aufl.] Klassiker. München: Addison-Wesley   |
|   | <b>M. GÖHLER und T. J. HOWARD (2014):</b> „Framework for the Application of Robust Design Methods and Tools“. In: S. 123–133   |
| ✓ | <b>J. GÖPFERT (1998):</b> <i>Modulare Produktentwicklung</i> . Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag   |
|   | <b>S. GRAMLICH (2013):</b> „Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwicklen: Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt  |
|   | <b>P. GROCHE ET AL. (2012):</b> „Integration of manufacturing-induced properties in product design“. In: <i>CIRP Annals - Manufacturing Technology</i> 61.1, S. 163–166  |
|   | <b>K.-H. GROTE und J. FELDHUSEN, Hrsg. (2014):</b> <i>Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau</i> . Hrsg. von K.-H. GROTE und J. FELDHUSEN. 24., aktualisierte und erweiterte. Auflage. Berlin: Springer  |
|   | <b>J. GÜNTHER und K. EHRENSPIEL (1999):</b> „Comparing designers from practice and designers with systematic design education“. In: <i>Design Studies</i> 20.5, S. 439–451   |
| ✓ | <b>L. C. HALE (1999):</b> „Principles and techniques for designing precision machines“. Diss. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory  |
|   | <b>H. HANSELKA und R. PLATZ (2010):</b> „Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“. In: <i>Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe</i> 11/12, S.55–62   |
|   | <b>T. HASENKAMP (2010):</b> „Engineering Design for Six Sigma-a systematic approach“. In: <i>Quality and Reliability Engineering International</i> , S. 317–324  |
|   | <b>T. HASENKAMP ET AL. (2007):</b> „Robust Design Methodology in a Generic Product Design Process“. In: <i>Total Quality Management &amp; Business Excellence</i> 18.4, S. 351–362   |
|   | <b>T. HASENKAMP ET AL. (2009):</b> „A review of practices for robust design methodology“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 20.6, S. 645–657  |

---

|   |  |
|---|--|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>  |
|   | <b>B. HEIDEMANN (2001):</b> „Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt   |
| ✓ | <b>S. HESSE (1994):</b> <i>Montage-Atlas: Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren</i> . Atlas Konstruktion. Darmstadt: Hoppenstedt Technik-Tab.-Verl.  |
| ✓ | <b>G. HOENOW und T. MEISSNER (2016):</b> <i>Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau: Bauteile - Baugruppen - Maschinen</i> . 4., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag  |
| 0 | <b>I. HORVÁTH, Hrsg. (2004):</b> <i>Tools and methods of competitive engineering: Proceedings of the TMCE 2004 Symposium, Lausanne, Switzerland</i> . Hrsg. von I. HORVÁTH. Rotterdam: Millpress   |
|   | <b>T. J. HOWARD ET AL. (2014):</b> „The Variation Management Framework (VMF) for Robust Design“. In: <i>Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014</i> . Hrsg. von T. J. HOWARD ET AL. Copenhagen: Technical University of Denmark, DTU  |
|   | <b>F. HUBER und W. F. DAENZER, Hrsg. (2002):</b> <i>Systems Engineering: Methodik und Praxis</i> . Hrsg. von F. HUBER und W. F. DAENZER. 11., durchges. Aufl. Zürich: Verl. Industrielle Organisation  |
|   | <b>V. HUBKA und W. E. EDER (1992):</b> <i>Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Ableitungen</i> . 1. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer   |
|   | <b>C. JILG (2015):</b> „Konstruktionshilfen zur methodischen Entwicklung umweltgerechter Produkte“. MT. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt  |
| ✓ | <b>R. JUGULUM und D. D. FREY (2007):</b> „Toward a taxonomy of concept designs for improved robustness“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 18.2, S. 139–156   |
|   | <b>L. J. KAMM (1993):</b> <i>Designing cost-efficient mechanisms: Minimum constraint design, designing with commercial components, and topics in design engineering</i> . Society of Automotive Engineers. Electronic publications. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr., Wallendale PA USA): Society of Automotive Engineers |
| ✓ | <b>D. A. KEESE ET AL. (2007):</b> „Empirically-Derived Principles for Designing Products With Flexibility for Future Evolution“. In: <i>ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference</i> . Hrsg. von ?, S. 483–498                                 |
|   | <b>F. KESSELRING (1954):</b> <i>Technische Kompositionslehre: Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen</i> . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg   |

|   |  |
|---|--|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>  |
| ✓ | <b>B. KLEIN (2013):</b> <i>Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung</i> . 10., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden   |
|   | <b>B. V. KOEN (1988):</b> <i>Definition of the Engineering Method</i> . 4. print. Washington: American Society for Engineering Education   |
| ✓ | <b>R. KOLLER (1998):</b> <i>Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen</i> . 4., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer   |
|   | <b>M. KOSTER (2008):</b> <i>Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren: Konstruktionsprinzipien für das präzise Bewegen und Positionieren</i> . 5e, herz. dr. Baarn: HB Uitgevers  |
|   | <b>W. KRAUSE, Hrsg. (2012):</b> <i>Grundlagen der Konstruktion: Elektronik ; Elektrotechnik ; Feinwerktechnik ; Mechatronik</i> . Hrsg. von W. KRAUSE. 9. Aufl. Studienbücher der technischen Wissenschaften. München Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag |
| ✓ | <b>W. KRAUSE und E. BÜRGER, Hrsg. (2000):</b> <i>Gerätekonstruktion: In Feinwerktechnik und Elektronik</i> . Hrsg. von W. KRAUSE und E. BÜRGER. 3., stark bearb. Aufl. München: Hanser   |
|   | <b>E. KROLL ET AL. (2001):</b> <i>Innovative conceptual design: Theory and application of parameter analysis</i> . Cambridge und New York: Cambridge University Press  |
| ✓ | <b>U. KURZ ET AL. (2009):</b> <i>Konstruieren, Gestalten, Entwerfen: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik</i> . 4., erw. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner  |
|   | <b>B. LEE und K. SAITOU (2003):</b> „Decomposition-Based Assembly Synthesis for In-Process Dimensional Adjustability“. In: <i>Journal of Mechanical Design</i> 125.3, S. 464   |
|   | <b>J. P. LEMBURG (2009):</b> „Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese“. Diss. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen   |
| ✓ | <b>A. LEYER (1964):</b> <i>Maschinenkonstruktionslehre: Heft 2. Allgemeine Gestaltungslehre</i> . Bd. 2. Technica-Reihe. Basel: Birkhäuser   |
|   | <b>U. LINDEMANN (2009):</b> <i>Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden</i> . 3., korrigierte Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg   |
|   | <b>J. MARZ (2005):</b> „Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (mPEP) für werkzeuggebundene Mikrotechniken“. Diss. Karlsruhe   |
| ✓ | <b>J. MATHIAS (2015):</b> „Auf dem Weg zu robusten Lösungen – Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den Frühen Phasen der Produktentwicklung“. Dissertation. Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt                          |

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>J. MATHIAS ET AL. (2010):</b> „Strategies and principles to design robust products“. In: <i>Design 2010</i> . Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 341–350   |
|   | <b>C. MATTHECK (2010):</b> <i>Denkwerkzeuge nach der Natur</i> . 1., unveränd. Nachdr. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie Campus Nord  |
| ✓ | <b>B. MATTHIASSEN (1997):</b> „Design for robustness and reliability: Improving the quality consciousness in engineering design“. Diss. Lyngby  |
|   | <b>S. MATTHIESEN (2002):</b> „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells “Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen” zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe  |
|   | <b>C. A. MATTSON und A. E. WOOD (2014):</b> „Nine Principles for Design for the Developing World as Derived From the Engineering Literature“. In: <i>Journal of Mechanical Design</i> 136.12, S. 121403   |
| ✓ | <b>D. MCADAMS (2003):</b> „Identification and codification of principles for functional tolerance design“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 14.3, S. 355–375  |
|   | <b>M. MØRUP (1993):</b> „Design for Quality“. Dissertation. Lyngby: Technical University of Denmark   |
|   | <b>E. MULET und R. VIDAL (2008):</b> „Heuristic guidelines to support conceptual design“. In: <i>Research in Engineering Design</i> 19.2-3, S. 101–112  |
| ✓ | <b>A. NEUDÖRFER (2014):</b> <i>Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie</i> . 6., aktual. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg  |
|   | <b>G. NIEMANN ET AL. (2005):</b> <i>Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen</i> . 4., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg  |
| ✓ | <b>D. A. NORMAN (2013):</b> <i>The design of everyday things</i> . Revised and expanded edition. New York, NY: Basic Books  |
| 0 | <b>M. L. NOWACK (1997):</b> „Design guideline support for manufacturability“. Diss. Cambridge: Selwyn College   |
|   | <b>M. OHMER (2008):</b> „Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact Channel Model C&CM“. In: <i>Forschungsberichte</i> . Hrsg. von A. ALBERS. Bd. 32. Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung  |
|   | <b>A. B. OKHOLM ET AL. (2014):</b> „Improving Process Capability Database Usage for Robust Design Engineering by Generalising Measurement Data“. In: <i>DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference, May 19 - 22, 2014, Dubrovnik - Croatia</i> . Hrsg. von D. MARJANOVIĆ ET AL. Glasgow: The Design Society, S. 1133–1144 |

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>M. A. ORLOFF (2006):</b> <i>Grundlagen der klassischen TRIZ: Ein Praktisches Lehrbuch DES Erfinderischen Denkens Fur Ingenieure</i> . VDI-Buch. Dordrecht: Springer  |
| ✓ | <b>K. N. OTTO und K. L. WOOD (2001):</b> <i>Product design: Techniques in reverse engineering and new product development</i> . Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall   |
| ✓ | <b>P. K. PALANI RAJAN ET AL. (2003):</b> „Design for Flexibility - Measures and Guidelines“. In: <i>Research for practice - innovation in products, processes and organisations</i> . Hrsg. von A. FOLKESON ET AL. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 1–10  |
| ✓ | <b>P. K. PALANI RAJAN ET AL. (2005):</b> „An empirical foundation for product flexibility“. In: <i>Design Studies</i> 26.4, S. 405–438  |
|   | <b>G.-J. PARK (2007):</b> <i>Analytic Methods for Design Practice</i> . London: Springer-Verlag London Limited  |
|   | <b>E. PEARCE (2003):</b> „Designing Active Smart Features to Provide Nesting Forces in Exactly Constrained Assemblies“. MT. Provo UT: Brigham Young University  |
|   | <b>M. S. PHADKE (1986):</b> „Design Optimization Case Studies“. In: <i>AT&amp;T Technical Journal</i> 65.2, S. 51–68  |
|   | <b>K. RATH ET AL. (2011):</b> „Which Guideline is most relevant? Introduction of a pragmatic design for energy efficiency tool“. In: <i>Design for X, design to X</i> . Hrsg. von S. J. CULLEY. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 293–301                  |
|   | <b>K. ROTH (1996):</b> <i>Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung: Mit 48 Konstruktionskatalogen und 52 Lösungssammlungen</i> . 2. Aufl., wesentlich erw. und neu gestaltet. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 3. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer |
| ✓ | <b>K. ROTH (2000):</b> <i>Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre</i> . 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 1. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer   |
|   | <b>K. ROTH (2001):</b> <i>Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 2: Kataloge</i> . 3. Aufl., mit wesentlichen Erg. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 2. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer   |
|   | <b>S. SANGELKAR ET AL. (2012):</b> „User activity – product function association based design rules for universal products“. In: <i>Design Studies</i> 33.1, S. 85–110  |
|   | <b>T. SAUER (2006):</b> „Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen“. Diss. Düsseldorf: Technische Universität Darmstadt  |

---

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
| ✓ | <b>M. SCHILLING (1982):</b> „Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik“. Diss. Ilmenau  |
|   | <b>B. SCHLEICH und S. WARTZACK (2013):</b> „Process-Oriented Tolerancing - A Discrete Geometry Framework“. In: <i>Design for harmonies</i> . Hrsg. von U. LINDEMANN. DS / The Design Society. Castle Cary, Somerset: Design Society, S. 061–070   |
| ✓ | <b>C. M. SCHLICK ET AL. (2010):</b> <i>Arbeitswissenschaft</i> . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg   |
| ✓ | <b>B. SHNEIDERMAN und C. PLAISANT (2005):</b> <i>Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction</i> . 4. ed. Boston, Mass.: Pearson  |
| ✓ | <b>V. SINGH ET AL. (2009):</b> „Innovations in Design Through Transformation: A Fundamental Study of Transformation Principles“. In: <i>Journal of Mechanical Design</i> 131.8, S. 081010   |
|   | <b>A. H. SLOCUM (1992):</b> <i>Precision machine design</i> . Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall   |
|   | <b>J. SMITH und P. J. CLARKSON (2000):</b> „A method for the improved robustness of mechanical design“. In:   |
|   | <b>J. SMITH und P. JOHN CLARKSON (2005):</b> „A method for assessing the robustness of mechanical designs“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 16.5, S. 493–509   |
|   | <b>D. K. SOBEK II ET AL. (1999):</b> „Toyota’s Principles of Set Based Concurrent Engineering“. In: <i>Sloan Management Review</i> 40.2, S. 67–83   |
|   | <b>R. SÖDERBERG ET AL. (2006c):</b> „Computer-aided robustness analysis for compliant assemblies“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 17.5, S. 411–428  |
| ✓ | <b>R. SÖDERBERG ET AL. (2006a):</b> „Managing physical dependencies through location system design“. In: <i>Journal of Engineering Design</i> 17.4, S. 325–346  |
| ✓ | <b>W. STEINHILPER und B. SAUER, Hrsg. (2012):</b> <i>Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen</i> . Hrsg. von W. STEINHILPER und B. SAUER. 8. Aufl. 2012. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg   |
|   | <b>W. STEINHILPER ET AL., Hrsg. (2012):</b> <i>Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben</i> . Hrsg. von W. STEINHILPER ET AL. 7. Aufl. Bd. / Waldemar Steinhilper; Bernd Sauer (Hrsg.) ; 2. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg |
| 0 | <b>H. W. STOLL (1994):</b> „Strategies for Robust Product Design“. In: <i>Journal of Applied Manufacturing Systems</i> , S. 3–8   |

---

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
| ✓ | <b>N. P. SUH (1990):</b> <i>The principles of design</i> . Bd. 6. Oxford series on advanced manufacturing. New York: Oxford University Press  |
| ✓ | <b>N. P. SUH (2001):</b> <i>Axiomatic design: Advances and applications</i> . The MIT-Pappalardo series in mechanical engineering. New York, NY: Oxford University Press  |
|   | <b>A. SUHM (1993):</b> „Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf der Basis von Lösungsmustern“. Diss. Karlsruhe  |
| ✓ | <b>K. G. SWIFT und J. D. BOOKER (2003):</b> <i>Process selection: From design to manufacture</i> . 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann   |
|   | <b>G. TAGUCHI ET AL. (2005):</b> <i>Taguchi's quality engineering handbook</i> . Hoboken, N.J, Livonia, Mich: John Wiley & Sons   |
|   | <b>D. TATE (1999):</b> „A roadmap for decomposition: activities, theories and tools for system design“. Dissertation. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology   |
|   | <b>A. E. TEKKAYA ET AL. (2015):</b> „Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties“. In: <i>CIRP Annals - Manufacturing Technology</i> 64.2, S. 629–653   |
|   | <b>A. C. THORNTON (2004):</b> <i>Variation risk management: Focusing quality improvements in product development and production</i> . Hoboken, NJ: Wiley  |
| 0 | <b>D. G. ULLMAN (2010):</b> <i>The mechanical design process: [product discovery, project planning, product definition, conceptual design, product development, product support]</i> . 4. ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston u.a.: McGraw-Hill Higher Education |
| ✓ | <b>K. T. ULRICH und S. D. EPPINGER (2008):</b> <i>Product design and development</i> . 4. ed., internat. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin  |
| ✓ | <b>M. J. VAN WIE (2002):</b> „Designing Product Architecture: A Systematic Method“. Diss. Austin: University of Texas   |
| ✓ | <b>F. VASCONCELOS (2015):</b> „Potenziale und Grenzen generativer Fertigungsverfahren und ihre Berücksichtigung bei der Produktentwicklung“. Masterthesis. Darmstadt  |
| ✓ | <b>VDI 2244 (1988):</b> <i>Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse</i> . Düsseldorf: VDI Verlag GmbH  |
| ✓ | <b>VDI 2223 (2004):</b> <i>Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Systematic embodiment design of technical products</i> . Bd. 03.100.40. Berlin: Beuth Verlag GmbH   |
| ✓ | <b>VDI 2242 (2016):</b> <i>Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse</i> . Düsseldorf: VDI Verlag GmbH   |
|   | <b>VDI 2221 (1993):</b> <i>Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte</i> . Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH  |



---

|   |   |
|---|---|
| ✓ | <b>Werk - Fortsetzung</b>   |
|   | <b>VITRUVIUS und F. v. REBER (2012):</b> <i>Zehn Bücher über Architektur: De architectura libri decem</i> . 2. Aufl. Wiesbaden: Marixverl.  |
|   | <b>C. WAGNER ET AL. (2016):</b> „Process integrated design guidelines - Systematically linking manufacturing processes to product design“. In: <i>Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference</i> . Hrsg. von D. MARJANOVIĆ ET AL. Glasgow: Design Society, S. 739–748                    |
|   | <b>D. E. WHITNEY (2004):</b> <i>Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development</i> . Oxford series on advanced manufacturing. New York: Oxford University Press  |
|   | <b>F. WUTTKE ET AL. (2011a):</b> „Robustness of Inventive Design Solutions - Transferring the Robust Design Focus from Production Process to Development Process“. In: <i>Proceedings of the 21st CIRP Design Conference, Korea 2011 : Interdisciplinary Design</i> . Hrsg. von M. K. THOMPSON. KAIST, S. 123–129 |
|   | <b>F. WUTTKE ET AL. (2011b):</b> „Early Robustness Optimization of Automotive Modules - Regarding the Key Impact of the Human Factor“. In: <i>Impacting society through engineering design</i> . Hrsg. von S. J. CULLEY. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 175–284                                 |
|   | <b>P. YAMMIYAVAR (2005):</b> „Usability heuristics and their role in designing vehicles – A case study of an electric-hybrid vehicle body design“. In: <i>Journal of the Indian Institute of Science</i> 85.Mar.-Apr. S. 67–82  |
|   | <b>S. ZIER (2013):</b> „Elementarmethoden in der Produktentwicklung: Identifikation methodischer Prinzipien und ihre Potenziale für Lehre, Praxis und Forschung“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt   |

---

# B RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Produktionsprozessen

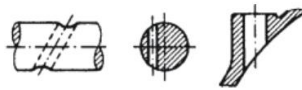
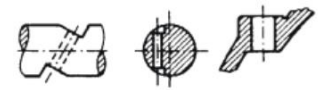
## B.1 Fertigungsprozesse

### B.1.1 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung

Tabelle B.1: Allgemeine *Gestaltungshinweise zum Spanen*  
Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 258

| Ziel | Gestaltungshinweis  |
|------|---|
| Ei   | An einem Teil gleiche Gestaltzonen (Gewinde, Lochdurchmesser, Ausrundungsradien), gleiche Werkzeuge und genormte Lehren verwenden |
| F    | Möglichst alles in einer Aufspannung bearbeiten   |
| U    | Bemaßung vom Koordinatenursprung aus vornehmen  |
| S    | lange, dünne Abschnitte und tiefe Taschen vermeiden, da sie Vibration verursachen können  |

Tabelle B.2: Hinweise zur *bohrgerechten Gestaltung*  
Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 260; FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 691; KOLLER (1998), S. 228; OTTO und WOOD (2001), S. 681

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig  | besser  |
|------|--|--|---|
| Q, S | Ansatz- und Auslauffläche sollten senkrecht zur Bohrachse stehen |  |  |

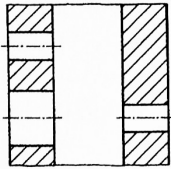
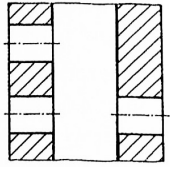
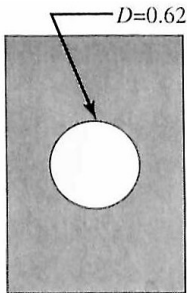
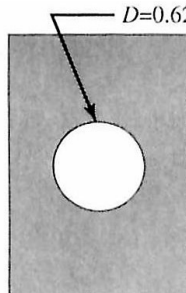
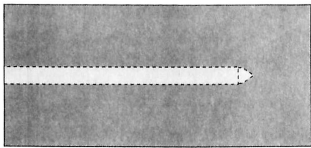


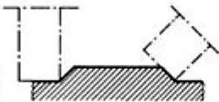
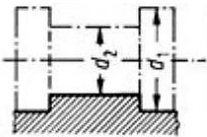
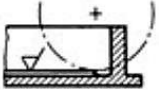
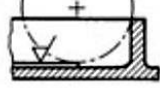
|       |  |   |   |
|-------|--|---|---|
| Ei, F | Bohrungen gleichen Durchmessers anstreben  |    |    |
| Ei    | Standardisierte Abmessungen verwenden  |    |    |
| Q, F  | Lange, dünne Bohrungen vermeiden (Bohrer verläuft)   |   |   |
| Q, F  | Gleich harte Werkstoffe beim Bohren in die Trennfläche gefügter Teile (Bohrer verläuft)            |  |  |
| F     | gestufte Bohrungen vermeiden: höhere Anzahl Prozesse, Fehlermöglichkeiten bei erneuter Zentrierung |   |   |

Tabelle B.3: Hinweise zur *fräsgerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 261; Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 692

| Ziel  | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|-------|--|---|---|
| Ei, F | Abmessungen so wählen, dass Satzfräser verwendet werden können |  |  |
| Q, A  | Werkzeugauslauf an Fräserdurchmesser anpassen                  |  |  |

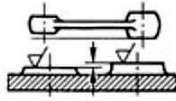
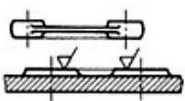
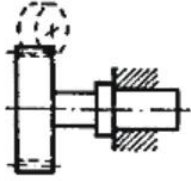
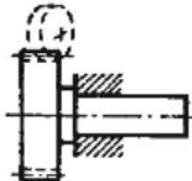
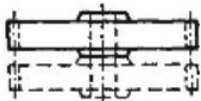
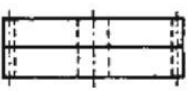
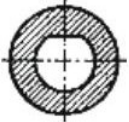
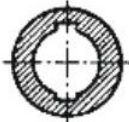


|      |   |   |  |
|------|---|---|--|
| F    | Flächen in gleicher Höhe anordnen (Durchfräsen möglich)                               |    |   |
| Q,A  | Spannfläche möglichst nah an Bearbeitungsfläche                                       |   |   |
| S, F | Gleiche Teile so gestalten, dass Zusammenspannung möglich zur gemeinsamen Bearbeitung |   |   |
| Q, A | beim Räumen symmetrische Formen vorsehen, Räumna-<br>del verläuft sonst               |   |   |
| Q, E | Ein- und Auslaufkante senkrecht zur Räumrichtung                                      |  |  |

Tabelle B.4: Hinweise zur *schleifgerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 262; FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 692

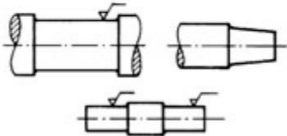
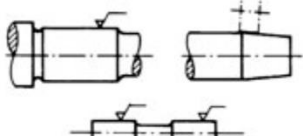
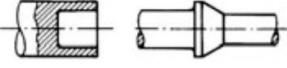
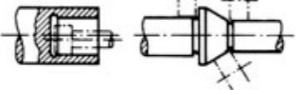
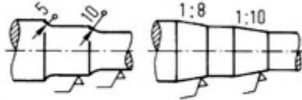
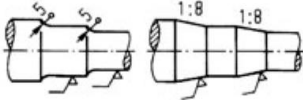
| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser  |
|------|---|--|---|
| Q, S | Bundbegrenzungen vermeiden  |  |  |
| Q, U | Schleifscheibenauslauf vorsehen   |  |  |
| Ei   | Gleiche Ausrundungsradien und Neigungen an einem Werkstück bevorzugen   |  |  |
| Z    | auf Dauer fest miteinander verbundene Teile, bei denen es auf Genauigkeit ankommt, im montierten Zustand bearbeiten, enge Tolerierung von zwischenliegenden Fügeflächen wird eingespart |  |   |

Tabelle B.5: Hinweise zur *drehgerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 259; FELDHOSEN ET AL. (2013), S. 691

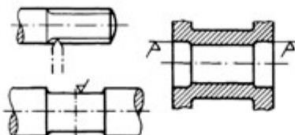
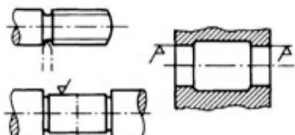
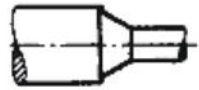
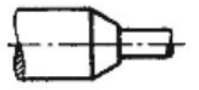
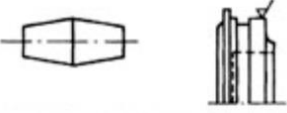
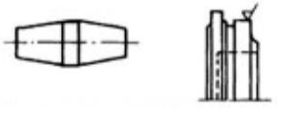
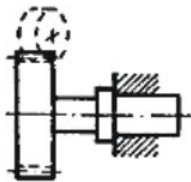
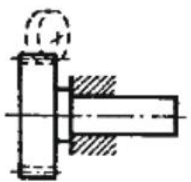
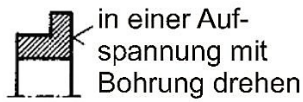


| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig  | besser  |
|------|--|--|---|
| Q, A | Erforderlichen Werkzeugauslauf beachten  |   |    |
| Q    | Kegeldrehen erleichtern durch Auslaufstellen   |   |    |
| E    | ausreichende Spannmöglichkeiten vorsehen   |   |    |
| A    | Spannfläche möglichst nah an Bearbeitungsfläche legen  |  |   |
| F, S | möglichst in einer Aufspannung drehen, Positionierfehler bei Umspannen werden vermieden                  |  |   |
| Q, F | für genau senkrechte Lage von Stirnflächen zur Drehachse Stirnfläche gemeinsam mit Zylinderfläche drehen |  |  in einer Aufspannung mit Bohrung drehen |

Tabelle B.6: Hinweise zur *gesenkschmiedegerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 251-252; FELDHOSEN ET AL. (2013), S. 686; KURZ ET AL. (2009), S. 122-126

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|------|--|---|---|
| A, Q | Schmiedeflächen, zwischen denen enge Toleranzen eingehalten werden müssen, möglichst klein halten, Prägeflächen maßhaltig klein halten |  |  |

|      |  |  |  |
|------|--|--|--|
| Q, F | Teilfugen etwa in halber Höhe senkrecht zur kleinsten Höhe anordnen  |  |  |
| F    | einfache, gleichmäßige, rotationssymmetrische Form anstreben, unregelmäßige Gestalt, schwierige Kurven und tiefe Einformungen vermeiden                    |  |  |
| Q, S | Formen anstreben, wie sie bei freier Stauchung entstehen   |  |  |
| Q, F | Schroffe Querschnittübergänge, scharfe Kanten und extreme Werkstoffanhäufungen vermeiden   |  |  |
| Q    | Böden sind schmiedetechnisch dann günstig gestaltet, wenn ihre Dicke von der Mitte nach außen stetig unter einem Winkel von 3°-5° oder als Parabel zunimmt |  |  |
| Q    | Vorsehen großer Rundungen und fließender Übergänge; schlanke Rippen, Hohlkehlen und zu kleine Löcher vermeiden   |  |  |
| Q    | Teilfugen bei napfförmigen Teilen großer Tiefe versetzen   |  |  |
| K, Z | Teilfuge so anordnen, dass Versatz leicht erkennbar und die Gratnaht leicht entfernbar ist   |  |  |



|      |   |   |   |
|------|---|---|---|
| Q, F | Bearbeitungsflächen hervorheben (z. B. um Werkzeugauslauf zu ermöglichen) |  |  |
|------|---|---|---|

Tabelle B.7: Hinweise zur *Gestaltung von Kaltfließpressteilen*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 252; FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 688





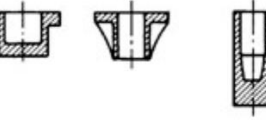
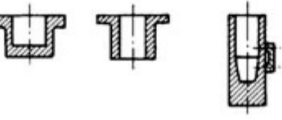
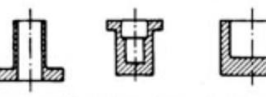

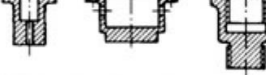
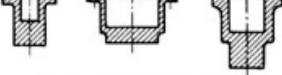

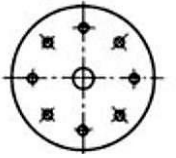
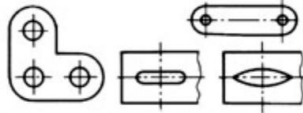
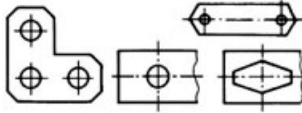
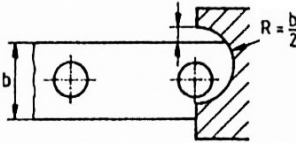
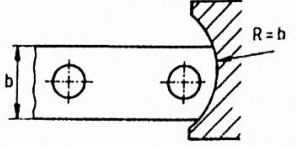
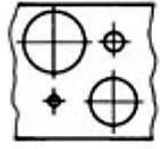
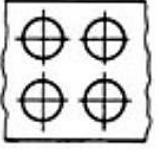
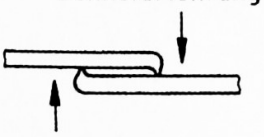
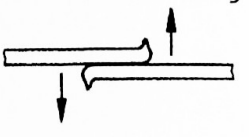
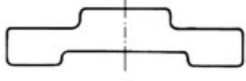
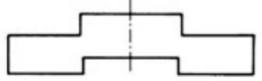
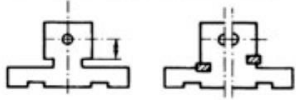
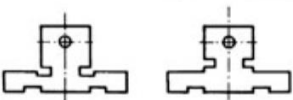
| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|------|--|---|---|
| Q    | Unterschneidungen vermeiden  |    |    |
| Q    | Seitenschrägen und kleine Durchmesserunterschiede vermeiden                              |    |    |
| Q, F | rotationssymmetrische Körper ohne Werkstoffanhäufungen anstreben, sonst teilen und fügen |  |  |
| Q    | scharfe Querschnittsänderungen, scharfe Kanten und Hohlkehlen vermeiden                  |  |  |
| Q    | kleine, lange oder seitliche Löcher sowie Gewinde vermeiden, besser bohren               |  |  |

Tabelle B.8: Hinweise zur *Gestaltung von Blechteilen*

Quelle: FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 636-642, 690-693; KOLLER (1998), S.223-227

| <b>Schneiden/Stanzen</b> |   |  |   |
|--------------------------|---|--|---|
| <b>Ziel</b>              | <b>Gestaltungshinweis</b>   | <b>ungünstig</b>   | <b>besser</b>   |
| F, Ei                    | Einfache Schnittkanten-geometrien und minimale Kan-tenlängen bevorzugen                     |    |    |
| F                        | Abgeschrägte Ecken bevor-zugen, Rundungen vermei-den  |    |    |
| E, F                     | bei zylinderförmigen Teil-konturen tangentielle Flä-chenübergänge vermeiden                 |   |   |
| Ei                       | Wiederholformen verwen-den  |  |  |
| U                        | Bei überlappenden Teilen die Lage der Schnittgrade beachten                                 |  |  |
| Q, Z                     | Scharfkantige Übergänge anstreben, da Schleifen des Schneidstempels erleichtert wird        |  |  |
| Q, A, U                  | Werkstückformen anstre-ben, die bei Folgeschnitten nicht gegen Schnittversatz anfällig sind |  |  |
| <b>Biegen</b>            |   |  |   |



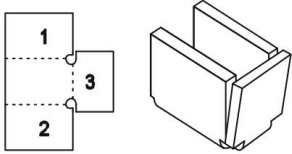
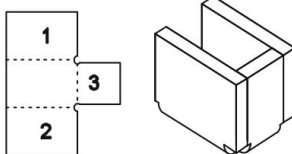
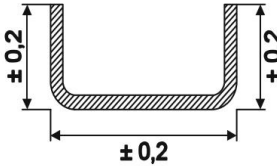
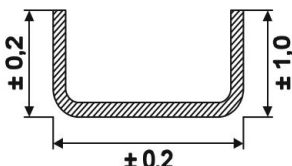
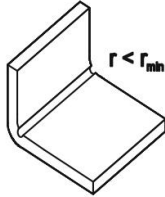
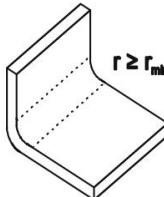
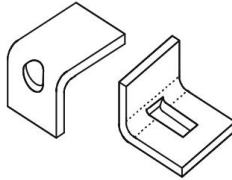
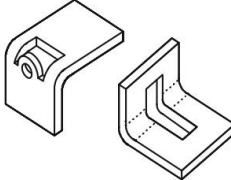

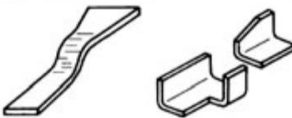


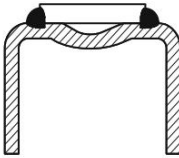
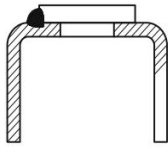
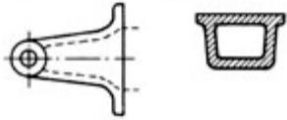
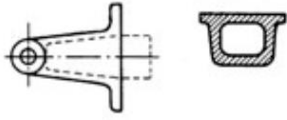
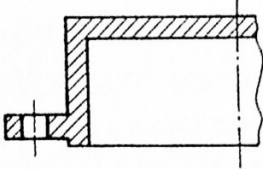
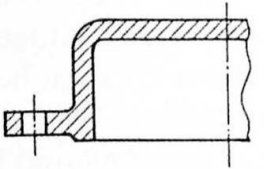
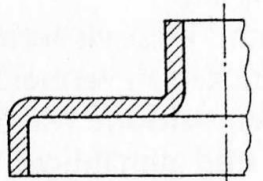
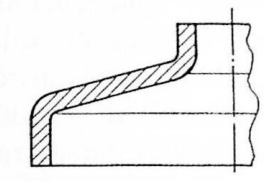
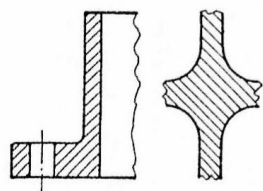
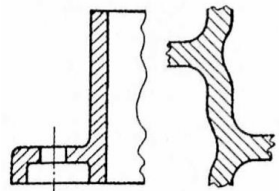
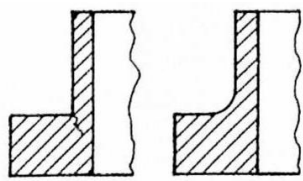
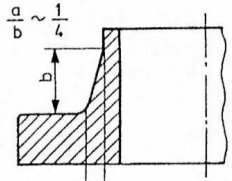
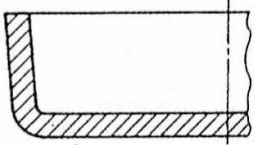
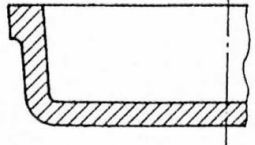
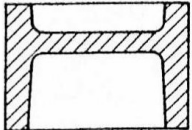
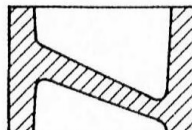
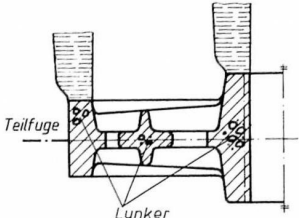
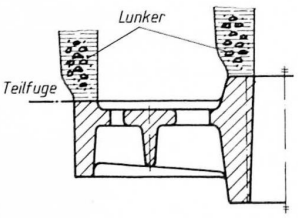
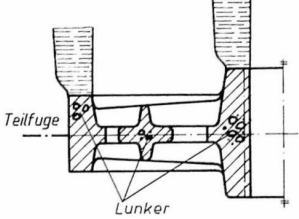
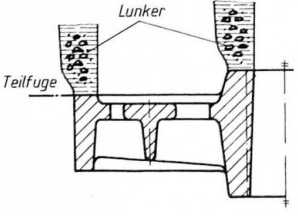
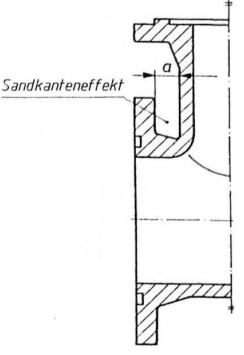
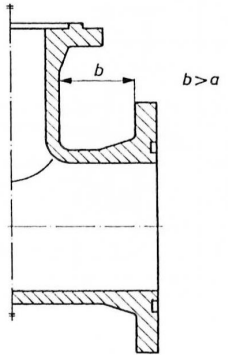
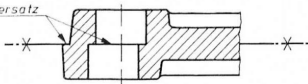
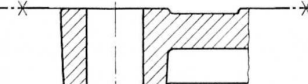


| Ziel                         | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser  |
|------------------------------|---|--|---|
| E, A                         | Rückfedern beim Biegen beachten   |    |    |
| A                            | ein Biegeschenkel muss die Toleranz aufnehmen                               |     |    |
| Q, F                         | Mindestwerte für Biegeradien beachten                                       |     |    |
| Q, F                         | Öffnungen außerhalb der Biegezone anstreben oder über diese hinweg vorsehen |   |  |
| Q, F                         | Außenkanten im Biegebereich möglichst rechtwinklig zur Biegekante anordnen  |  |  |
| Q, A, U                      | Falzstege mit genügender Breite vorsehen                                    |   |  |
| <b>Schweißen von Blechen</b> |   |  |   |
| Ziel                         | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser  |
| A                            | Verzug von Schweißkonstruktionen reduzieren                                 |   |  |

Tabelle B.9: Hinweise zur *gießgerechten Gestaltung*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 235-237; FELDUSEN ET AL. (2013), S. 685-686; KOLLER (1998), S. 216-221; KURZ ET AL. (2009), S. 101-107

| <b>Modell- und formgerecht</b> |   |  |   |
|--------------------------------|---|--|---|
| <b>Ziel</b>                    | <b>Gestaltungshinweis</b>   | <b>ungünstig</b>   | <b>besser</b>   |
| F, Ei                          | Einfache Modelle und Kerne aus Ebenen, Quadern und Zylindern mit möglichst wenig Teileoberflächen                   |    |    |
| <b>Gute Gussqualität</b>       |   |  |   |
| <b>Ziel</b>                    | <b>Gestaltungshinweis</b>   | <b>ungünstig</b>   | <b>besser</b>   |
| Q                              | Kanten von Gussteilen ab-runden   |   |   |
| Q, S                           | Waagrecht liegende Flä-chen vermeiden, geneigte Flächen vorziehen   |  |  |
| Q, S                           | Gleichmäßige Wanddicken und Bauteilquerschnitte anstreben: Materialanhäu-fungen vermeiden, Rippen versetzt anordnen |  |  |
| Q, S                           | Schroffe Übergänge zwi-schen unterschiedlichen Wandstärken vermeiden  |  |  |

|                |   |   |   |
|----------------|---|---|---|
| Q, S           | Randverstärkungen bei dünnwandigen Gussstücken vorsehen (ungleiche Abkühlung vermeiden)     |    |    |
| A              | Schrumpfspannungen durch nachgiebige Zwischenzonen reduzieren                               |    |    |
| Q, S           | Durch gelenkte Erstarrung Lunkerbildung in den Speißer verlegen                             |    |    |
| Q, S           | Unsymmetrische Teile unterstützen gelenkte Erstarrung und wirken der Lunkerbildung entgegen |   |   |
| Q, U           | bei Sandgussverfahren Sandkanteneffekt vermeiden  |  |  |
| A              | richtige Lage der Teilfuge erhöht die Form- bzw. Maßgenauigkeit                             |  |  |
| Q              | keine Querschnittsverengungen zwischen Anguss und Steiger                                   |  |  |
| Nachbearbeiten |   |   |   |



| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser  |
|------|---|--|---|
| S    | Spann- und Positionierflächen für sicheres, verformungsfreies Befestigen zur Weiterverarbeitung vorsehen  |  |  |
| A    | Automatisch bearbeitete Gießteile in der Nähe wichtiger Flächen positionieren und spannen, Modell- oder Kernversatz führt so nicht so sehr zu dünnen Wänden |  |   |
| S    | Gussspannungen können durch nachträgliches Glühen der Teile vermindert werden   |  |   |

Tabelle B.10: Hinweise zur *Gestaltung von Kunststoffteilen*

Quelle: KURZ ET AL. (2009), S. 179-181; OTTO und WOOD (2001), S. 677





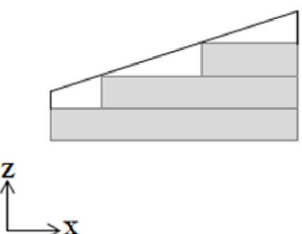
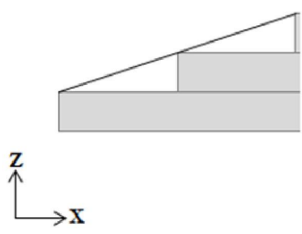
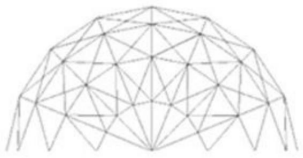
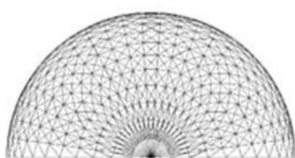
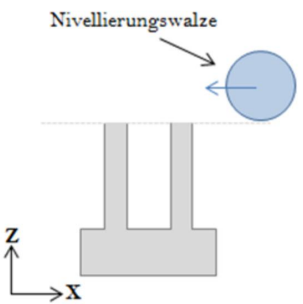
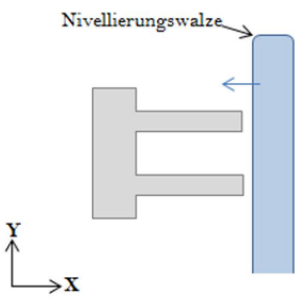
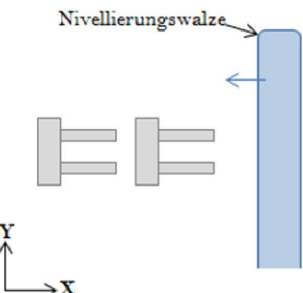
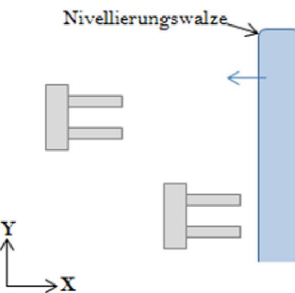
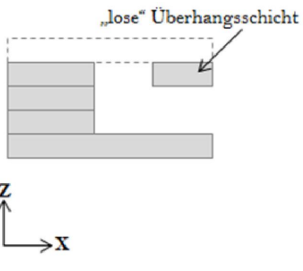
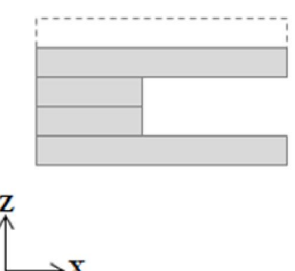
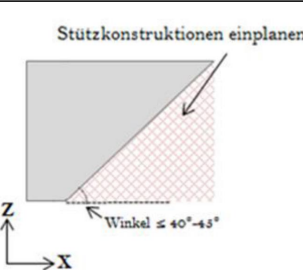
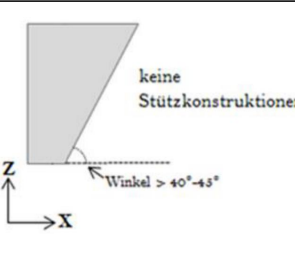
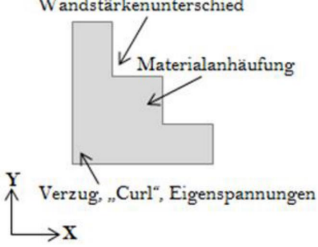
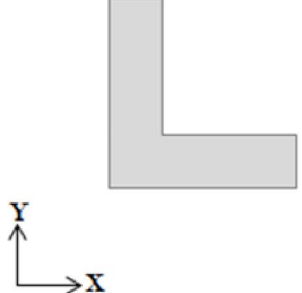
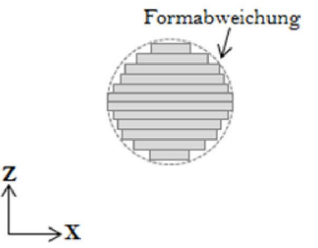
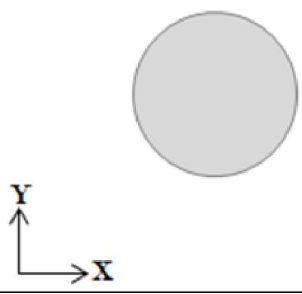
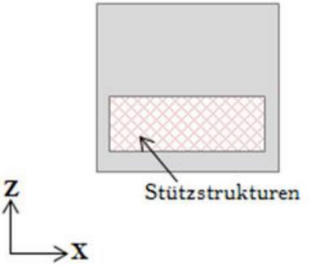
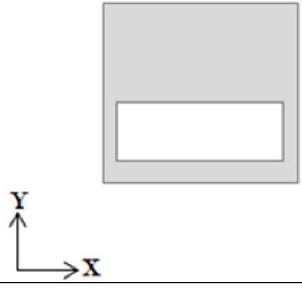
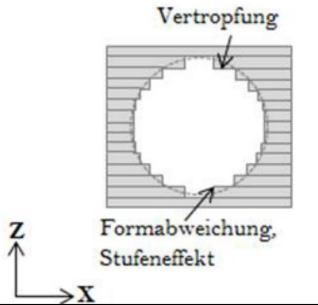
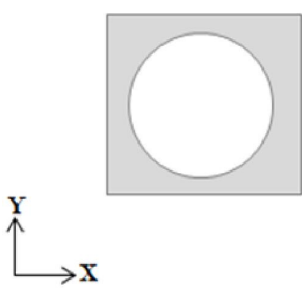
| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig  | besser  |
|------|--|--|---|
| Q, S | möglichst gleichmäßige Wanddicken, Materialanhäufungen vermeiden |   |   |
| Q, S | Plötzliche Querschnittsänderungen vermeiden                      |  |  |
| Q, S | Ecken und scharfe Kanten vermeiden                               |  |   |

Tabelle B.11: Gestaltungshinweise für die *generative Fertigung*

Quelle: nach VASCONCELOS (2015), S. VIII-XV

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig  | besser  |
|------|--|--|---|
| Q, F | Bei der Auslegung der Schnitte der einzelnen Schichten darauf achten, dass keine geometrischen Ungenauigkeiten entstehen |  |  |

|      |  |   |   |
|------|--|---|---|
| Q, F | Triangulationsfehler durch korrekte Anzahl und Größe der Dreiecke beim <i>STL-Format</i> vermeiden |    |    |
| Q, A | Dünne Wände in Richtung der Nivellierungswalze orientieren, um Knickgefahr zu reduzieren           |    |    |
| E, U | Versetzte Positionierung im Bauraum einhalten, um Folgebeschädigungen zu meiden                    |   |   |
| Q, E | „Lose“ Überhangsschichten umgehen oder stützen   |  |  |
| Q, E | Stützkonstruktionen ab einem Neigungswinkel von 40°-45° einplanen                                  |  |  |

|      |  |  |   |
|------|--|--|---|
| S    | Um Verzug entgegenzuwirken, Waddickenunterschiede und Materialanhäufungen vermeiden  |    |    |
| Q, F | Gekrümmte bzw. runde Oberflächen in die xy-Ebene legen   |    |    |
| Q, E | Taschen in xy-Richtung gelten als Überhänge, gegebenenfalls Stützstrukturen vorsehen; Taschen in z-Richtung sind problemlos herstellbar  |   |   |
| Q, F | Je schmaler eine Bohrung, desto eher soll die Bohrachse in Baurichtung orientiert sein; Orientierung von Bohrungen in xy-Richtung wegen dem Stufeneffekt und Vertropfungen vermeiden |  |  |

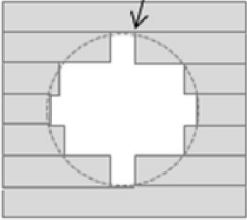
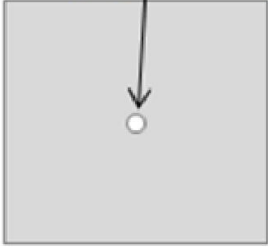
|      |   |   |   |
|------|---|---|---|
| Q, Z | Qualitativ hochwertige Bohrungen nachbohren |  |  |
|------|---|---|---|

Tabelle B.12: Hinweise zur *Gestaltung von Achsen und Wellen*  
Quelle: STEINHILPER und SAUER (2012), S. 424-425

| Ziel | Gestaltungshinweis   |
|------|--|
| ⚡    | geringe Stützweiten realisieren, besser: hohe Stützweiten sind unter Umständen durch geringe Steifigkeit robustheitsförderlich |
| V    | möglichst nur zweifache Lagerung   |
| A    | ausreichende axiale Verschiebemöglichkeit der Welle in der Lagerung ermöglichen  |

Tabelle B.13: Hinweise zur allgemeinen *fügegerechten Gestaltung*  
Quelle: FRENCH (1994), S. 231

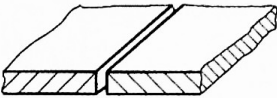
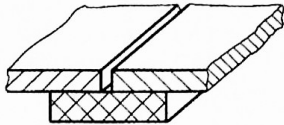
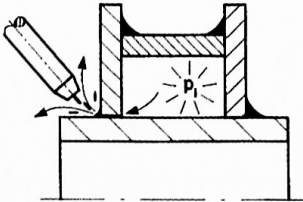
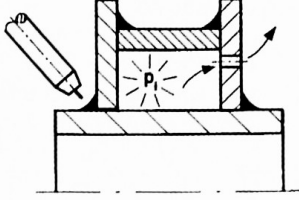
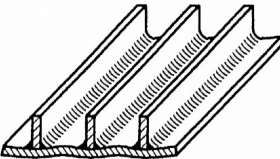
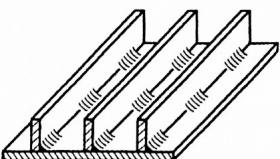
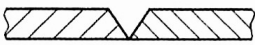



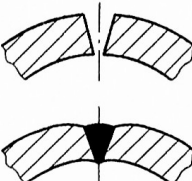
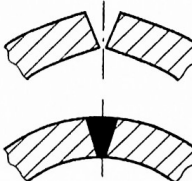


| Ziel | Gestaltungshinweis   |
|------|--|
| Q, K | beim Verbinden sehr flexibler Kanten überall gewünschten Schluss sicherstellen |

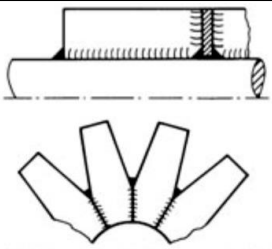
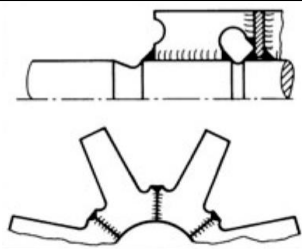
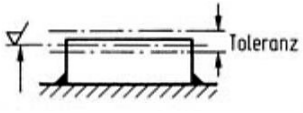
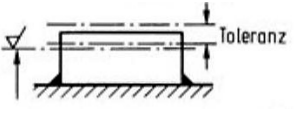
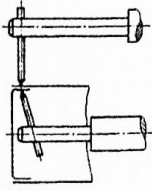
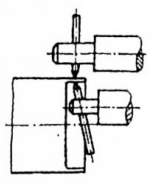

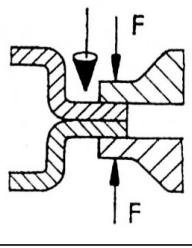
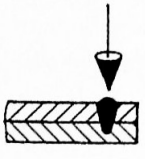
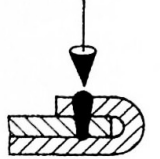
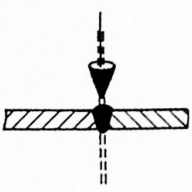
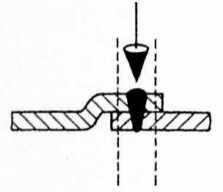
Tabelle B.14: Hinweise zur *schweißgerechten Gestaltung*

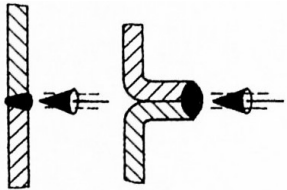
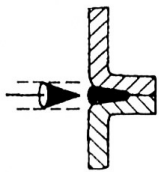
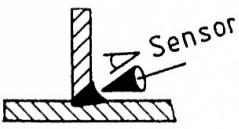
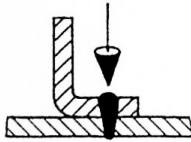
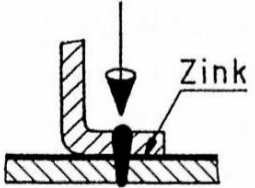
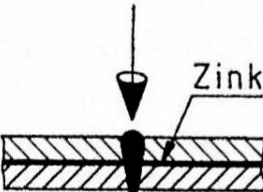
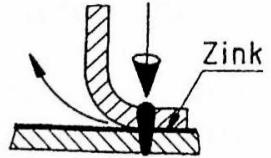
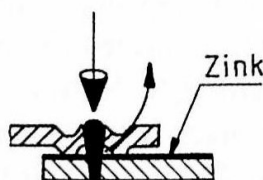
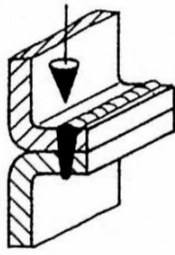
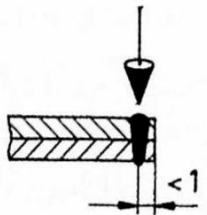
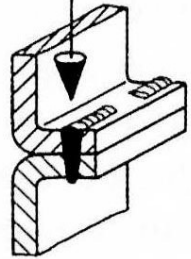
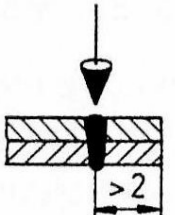
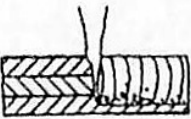
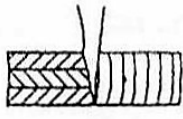
Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 273-274; FELDHOSEN ET AL. (2013), S. 698; KOLLER (1998), S. 230-241

| Schweißen allgemein |  |           |        |
|---------------------|--|-----------|--------|
| Ziel                | Gestaltungshinweis   | ungünstig | besser |
| Q, F, V             | Schweißnähte bei Walzprofilen nicht in Seigerungszone legen, Schweißnähte nicht in vorher kaltverformte Zonen legen (genaue Eigenschaften des Werkstoffes nicht bekannt) |           |        |
| Q, U                | Durch geeignete Gestaltung der Fugen konstante Spaltweite trotz Maß- und Formabweichungen sicherstellen  |           |        |
| Q, U                | Welligkeit von Blechenden durch Sicken oder Shocklines verhindern  |           |        |
| Q, V                | eindeutiges Positionieren zum Schweißen  |           |        |
| F, Ei               | Lösungen mit wenigen Teilen und Schweißnähten bevorzugen   |           |        |
| S                   | Zur problemlosen Brennerführung gut abtastbare oder erkennbare Fugenverläufe vorsehen  |           |        |



|      |   |  |  |
|------|---|--|--|
| Q, F | Weglaufen von Schmelzbädern mithilfe von Schmelzwannen verhindern   |   |   |
| E    | Störung des Schmelzbades infolge expandierender Gasvolumina durch Entlüftung verhindern   |    |    |
| S    | Verzug infolge von Wärmeeinbringung durch geringere Nahtvolumina, kürzere Schweißnähte oder geeignete Schweißreihenfolge reduzieren |   |   |
| A    | Thermische Verformungen durch symmetrische Wärmeeinbringung reduzieren  | <p>vor dem Schweißen</p>  <p>nach dem Schweißen</p>  | <p>vor dem Schweißen</p>  <p>nach dem Schweißen</p>  |
| A    | Thermische Verformungen durch entsprechendes Gestalten (Gegengestalten) des Verbindungsbereiches kompensieren                       |   |   |
| S    | Nahtanhäufungen und -kreuzungen vermeiden   |   |   |

|                                  |  |  |   |
|----------------------------------|--|--|---|
| A                                | Schrumpfspannungen durch elastische Anschlussquerschnitte mit niedrigen Steifigkeiten reduzieren |    |    |
| A, Z                             | Bearbeitungszugaben vorsehen, um Schweißtoleranzen auszugleichen                                 |    |    |
| <b>Widerstandspunktschweißen</b> |  |  |   |
| <b>Ziel</b>                      | <b>Gestaltungshinweis</b>  | <b>ungünstig</b>   | <b>besser</b>   |
| F                                | Kurze Elektroden und Elektrodenträger bevorzugen   |   |   |
| <b>Laserschweißen</b>            |  |  |   |
| <b>Ziel</b>                      | <b>Gestaltungshinweis</b>  | <b>ungünstig</b>   | <b>besser</b>   |
| S                                | möglichst nah an der Naht spannen, eine Spannbreite von mindestens 4mm vorsehen                  |  |  |
| F                                | Spanneinrichtungen nach Möglichkeit durch Falzverbindungen ersetzen                              |  |  |
| B, U                             | Toleranzbereich für Strahlpositionierung durch Überlappungen vergrößern                          |  |  |

|       |   |  |  |
|-------|---|--|--|
| B, U  | Toleranzen für Strahlpositionierung durch Selbstfokussierung mittels Strahlenfalle vergrößern |   |   |
| Ei, F | Fugen- und Nahtarten wählen, die keine Kanten-erfassung benötigen                             |   |   |
| E     | Bei zu verschweißenden verzinkten Blechen Entgasung durch geeignete Spalte ermöglichen        | <br>    | <br>    |
| S, A  | Verzug aufgrund thermischer Spannungen reduzieren   | <br> | <br> |
| Q, F  | Porenbildung reduzieren mittels Durchschweißen  |   |   |

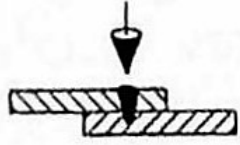
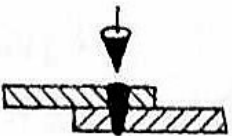
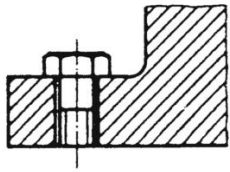
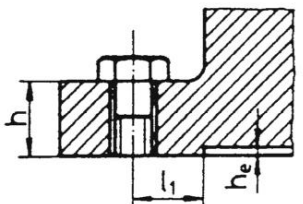
|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| K | Prüfen von Laserschweißnähten erleichtern |  |  |
|---|---|--|---|

Tabelle B.15: Hinweise zur *Gestaltung von Schraubverbindungen*

Quelle: STEINHILPER und SAUER (2012), S. 364

| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser  |
|------|---|--|---|
| V    | definierte Auflagefläche in der Trennfuge durch Einstich schaffen, Tiefe $h_e$ kleiner als 10% der Blatthöhe $h$ wählen |  |  |

## B.2 Montageprozesse

### B.2.1 Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage

Die Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage sind aufgeteilt auf die Teilprozesse

- *Lagern und Zuführen*,  
(siehe Tabelle B.16)
- *Handhaben und Greifen*  
(siehe Tabelle B.17)
- *Positionieren*  
(siehe Tabelle B.18)
- *Fügen*  
(siehe Tabelle B.19)
- *Verbinden*  
(siehe Tabelle B.20)
- *Einstellen, Justieren, Kontrollieren*  
(siehe Tabelle B.21)

- *Verpacken*  
(siehe Tabelle B.22).

Die zugehörigen, als robustheitsförderlich eingestuften, Konstruktionshinweise werden im Folgenden jeweils tabellarisch vorgestellt.

Tabelle B.16: Richtlinien zur *Unterstützung von Lagern und Zuführen*

Quelle: HESSE (1994), S. 16-17, 44-46, 212

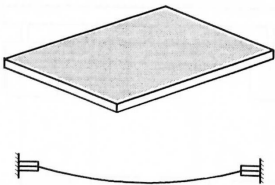
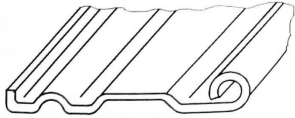
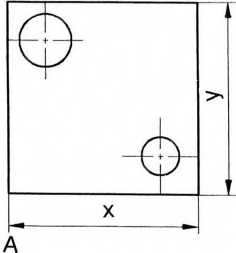
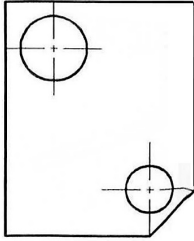
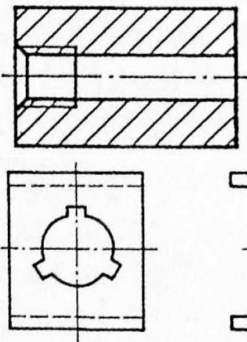
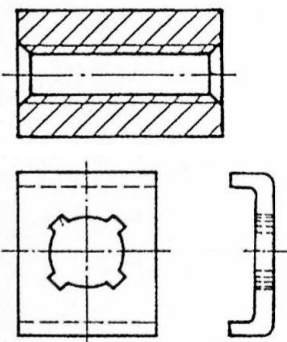
| Ziel    | Richtlinie  | ungünstig  | besser   |
|---------|---|--|--|
| E, A, U | Stabilität, Form und Qualität eventuell durch zusätzliche konstruktive Elemente bei Lagerung und Transport sicherstellen              |   |   |
| F       | Nebenformelemente vorsehen die als Ordnungsmerkmal verwendet werden können oder stelle die Teile geordnet (z. B. als Fließgut) bereit |  |  |

Tabelle B.17: Richtlinien zur *Unterstützung von Handhaben und Greifen*

Quelle: EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 288-290; HESSE (1994), S. 17-18, 69, 205; KOLLER (1998), S. 246-247; OTTO und WOOD (2001), S. 667

| Ziel | Richtlinie   | ungünstig   | besser  |
|------|--|---|---|
| F    | Leichte Lageerkennung durch (mehrfach) symmetrische Form |  |  |

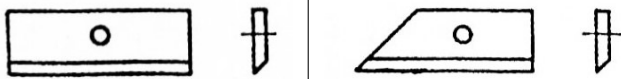
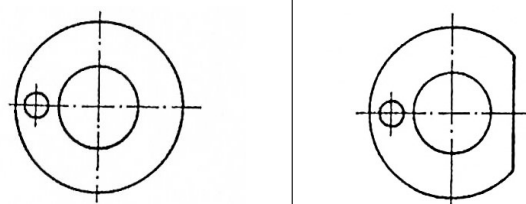
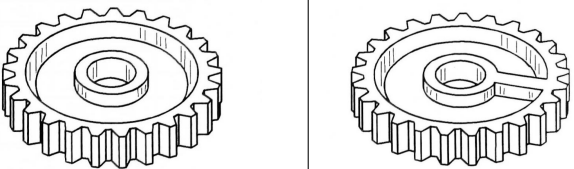
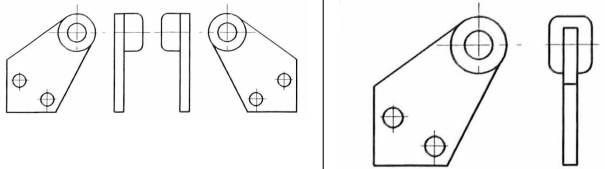

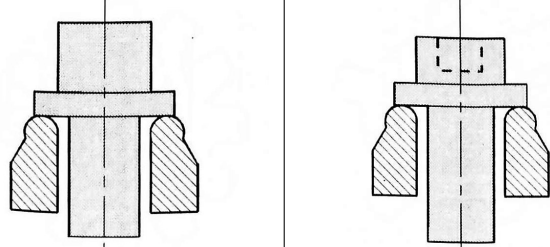
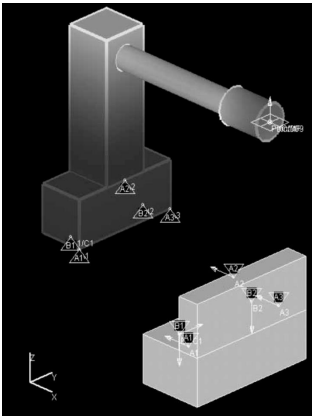
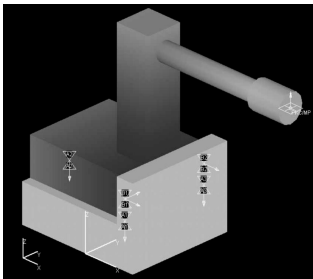
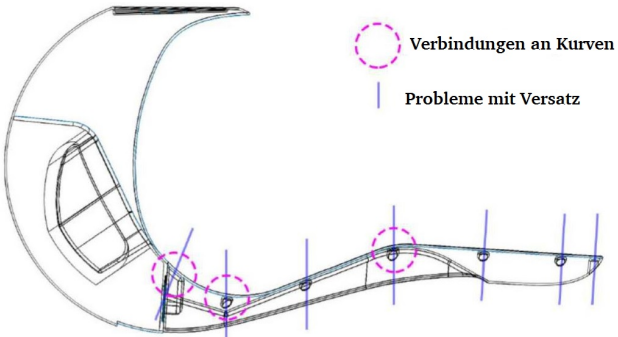
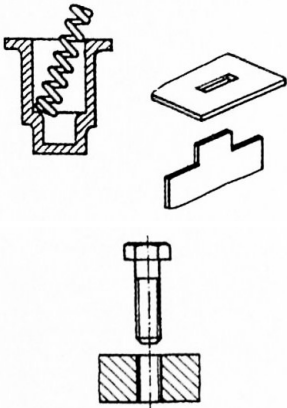
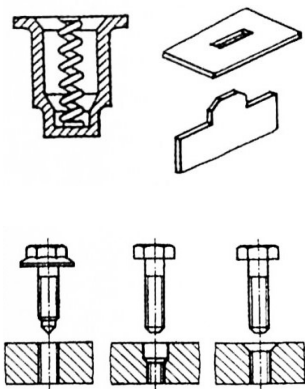
|       |   |  |  |
|-------|---|--|--|
| F     | Wenn Asymmetrie notwendig, dann deutlich gestalten oder Farbkodierung verwenden   |    |  |
| F     | Asymmetrische Erkennungsmerkmale an die Außenseite legen  |    |  |
| F     | Bei automatisierter Montage Teile erkenntungsgerecht gestalten  |    |  |
| F, Ei | Spiegelbildliche Teile vermeiden  |   |  |
| Z     | Auszuwuchtende Teile mit Rollstellen und Unwuchtwegnahmestellen versehen  |  |  |
| V     | Alle Flächen so gestalten, dass sich eindeutige Lagen (Ruheverhalten) ergeben und alle sechs Freiheitsgrade z. B. beim Spannen gebunden werden können |  |  |

Tabelle B.18: Gestaltungshinweise zur *Unterstützung der Positionierung*

Quelle: [21-23,50]Hesse.1994; KOLLER (1998), S. 249; SÖDERBERG ET AL. (2006)(1), S. 337

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|------|--|---|---|
| A    | Stützpunkte möglichst weit auseinander legen                             |    |    |
| A, Z | Bearbeitung während der Montage  |  |   |
| F    | Selbstpositionierung von Bauteilen anstreben, Positionierhilfen vorsehen |  |  |




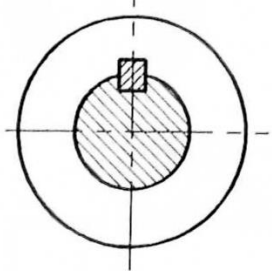
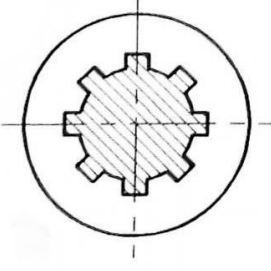
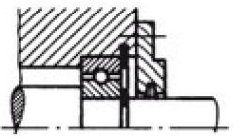
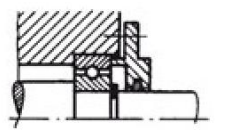
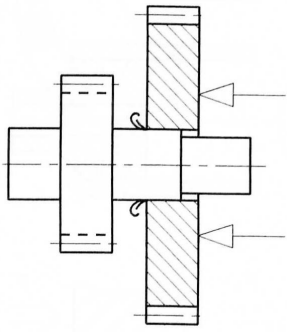
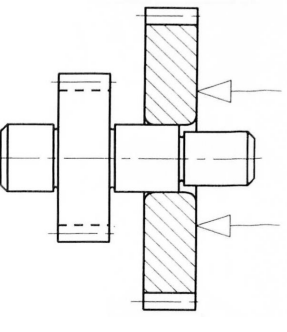
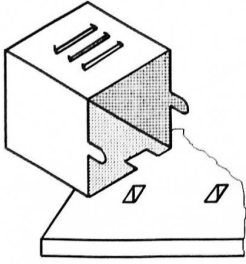
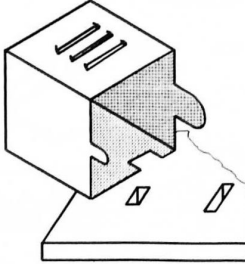


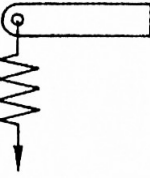
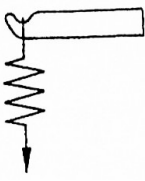
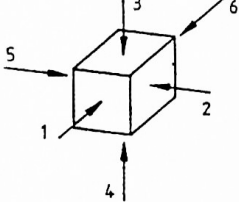
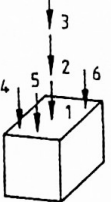
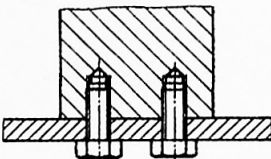
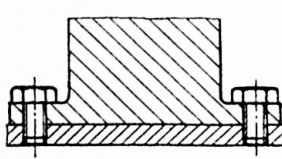
|    |   |  |  |
|----|---|--|--|
| F  | Endanschläge vorsehen   | Fixierung durch 2 Schrauben<br> | angestanzte Fixierung<br><br>angegossene Fixierung<br> |
| 4V | Bei zu paarenden Rundteilen Formmerkmale mehrmals anbringen   |                                |   |
| V  | selbsttätiges Ausrichten ohne Anpassen, Verstiften etc  |                               |    |
| F  | Übereinstimmung von Bohrbildern beim Fügen von Baugruppe zu Basisteil durch selbstzentrierende Formelemente erleichtern |  |  |
| V  | Für die eindeutige Lagebestimmung nötige Fügeflächen vorsehen   |  |  |

Tabelle B.19: Richtlinien zur *Unterstützung des Fügens*

Quelle: BOOTHROYD ET AL. (2011), S. 74-78; EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 287-289; FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 715-716; FRENCH (1992a), S. 211; HESSE (1994), S. 16-24, 68, 128, 133, 147; KOLLER (1998), S. 250-253; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 116-118

| Ziel | Richtlinie  | ungünstig  | besser  |
|------|---|--|---|
| F    | Bei Relativbewegung von Teilen einfaches Einführen unterstützen |  |  |



|       |   |   |   |
|-------|---|---|---|
| F     | Ausgeprägte Aufnahmestellen vorsehen  |                            |    |
| F, Ei | Zahl der Montageoperationen gering halten   |   |   |
| V     | Führungsflächen schmal und Stützflächen klein gestalten   |   |   |
| Ei    | Fügestellen vereinheitlichen  |   |   |
| St    | einheitliche, variantenunabhängige Montageoperationen anstreben                                       | <b>Schraubrichtung</b><br> |    |
| F, Ei | Einfache Fügebewegungen vorsehen  |                           |   |
| F, Ei | Anzahl der Fügeseiten und Montagerichtungen reduzieren, Teil möglichst nicht neu positionieren        |                          |  |
| K, F  | Fügestellen gut einsichtig anordnen   |                          |  |
| Ei, F | Fügeverfahren vorziehen, die die Baugruppe wenig belasten und gut automatisierbar sind, z. B. Kleben  |   |   |
| B     | Montagepunkte so vermaßen, dass auch bei Ausschöpfen der Maßtoleranzen das Fügen nicht behindert wird |   |   |

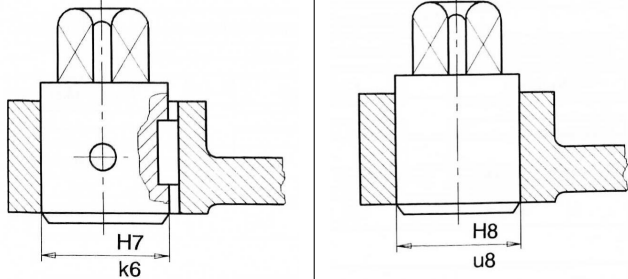
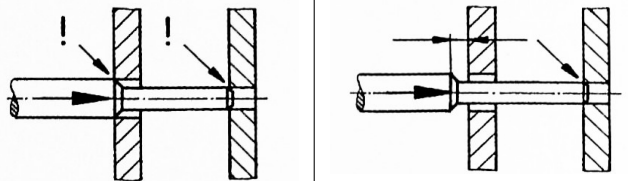
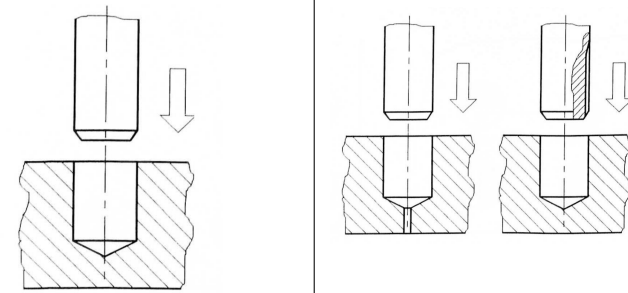
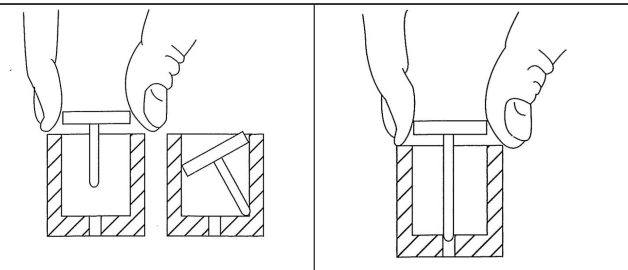
|      |  |  |  |
|------|--|--|--|
| B    | unnötige/enge Toleranzen/Passungen vermeiden   |    |  |
| V    | Anzahl der Montagepunkte reduzieren; Fügestellen, die gleichzeitig „anschnäbeln“ vermeiden; Fix-/Referenzpunkte schaffen |    |  |
| S, E | Luftpolster vermeiden, sonst Entlüftungsbohrungen/-Rillen vorsehen   |   |  |
| K, F | Fügen beobachtbar machen, z. B. an Außenkontur   |  |  |
| Ei   | Einheitliche Werkzeuge anstreben   |  |  |
| V    | Möglichst viele der zu bindenden Freiheitsgrade sperren  |  |  |
| V    | Lageveränderung gefügter (nicht verbundener) Bauelemente vermeiden   |  |  |
| U    | Zwangsfolgen vermeiden   |  |  |
| V, F | Festhalten von gefügten Teilen während anderer Montageoperationen vermeiden oder so kurz wie möglich anstreben           |  |  |

Tabelle B.20: Gestaltungshinweise zur *Unterstützung des Verbindens*

Quelle: BOOTHROYD ET AL. (2011), S. 110; EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 290; FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 716; KOLLER (1998), S. 264; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 116-118

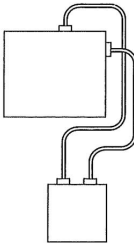
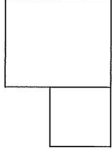
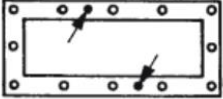
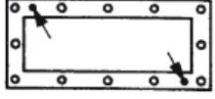
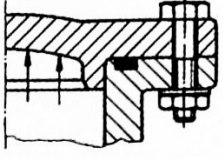
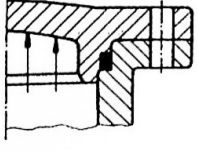
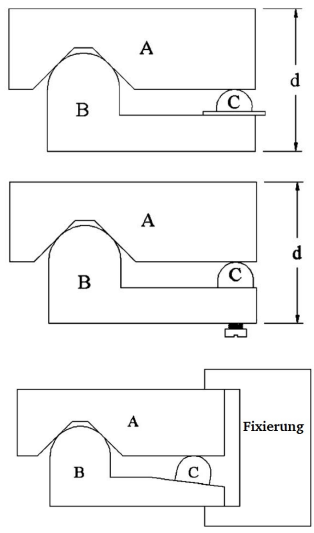
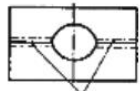
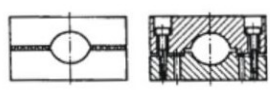
| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser   |
|------|---|--|--|
| F    | Separate Verbindungsmittel/ -teile vermeiden  |   |   |
| A    | Lagesicherung von Gehäuseteilen durch weit entfernte Pass-Stifte  |   |   |
| A, U | Kraftschlüssige Verbindungen sind so zu gestalten, dass diese von auftretenden Betriebskräften nicht negativ beeinflusst werden |  |  |
| Ei   | Einheitliche Verbindungselemente verwenden  |  |  |
| Ei   | Standardverbindungen einsetzen  |  |  |

Tabelle B.21: Gestaltungshinweise zur *Unterstützung von Einstellen, Justieren und Kontrollieren*

Quelle: DOWNEY ET AL. (2003), S. 238-241; EHRENSPIEL ET AL. (2014), S. 290; FRENCH (1994), S. 232; HESSE (1994), S. 20-22, 231; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 120

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|------|--|---|---|
| A, Z | Smart Features anwenden, wenn Überbestimmtheit notwendig ist   | Smart Features bieten eine wissensbasierte Auswahl von Verbindungen, mit dem Ziel die Sensitivität der Übertragungsfunktion zu verringern bzw. durch Anpassung Schwankungen zu kompensieren |   |
| Z    | Wenn ausgleichende Abweichung relativ und nicht absolut ist, selbstfixierende und selbstpositionierende Smart Features verwenden   |   |   |
| Z    | Einstellen statt Passen  |   |   |
| Z    | Gestufte Passteile oder stufenlose Einstellung verwenden   | <br><b>Übermaß</b>  |  |
| U    | Gesamtjustage einer Baugruppe oder eines Produktes in einzelne Justiervorgänge aufgliedern, die in sich abgeschlossene Handlungen darstellen und sich nicht gegenseitig beeinflussen |   |   |
| U    | Kompensationsglieder dürfen nicht Teil mehrerer verbundener Toleranzketten sein  |   |   |

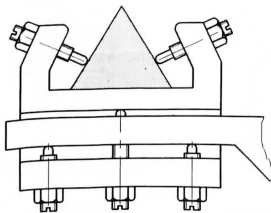
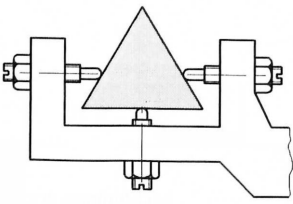
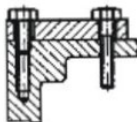
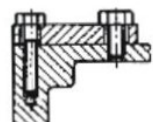
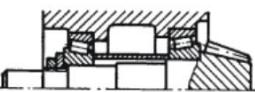
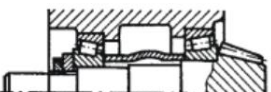
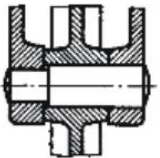
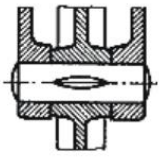
|      |   |  |  |
|------|---|--|--|
| U    | Pro Koordinatenrichtung eine Justiereinheit   |   |   |
| F    | Sich selbst kontrollieren durch unterschiedlich dicke Schrauben für unterschiedliche Zwecke |   |   |
| A, Z | Elastische, plastisch verformbare oder nachstellbare Teile statt enger Toleranzen verwenden |   |   |
| Ei   | Kerbstift spart abgesetzte Achse mit enger Passung; Durchbohren möglich                     |  |  |
| S    | Reinigen vermeiden bzw. erleichtern, verringert Korrosion                                   |  |  |

Tabelle B.22: Hinweise zur *Gestaltung von Verpackungen*

Quelle: KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 581-592

| Ziel | Gestaltungshinweis  |
|------|---|
| E    | Verpackung muss Packgut vor Umwelteinflüssen sowie die Umwelt vor dem Packgut schützen  |
| F    | Verpackung muss Gebrauch erleichtern, Nutzer/Arbeiter eindeutig über sachgemäße Behandlung und verpacktes Gut informieren sowie Verkauf fördern |

# C RopEx-Katalog: Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit in Nutzungsprozessen

## C.1 Funktionaler Zusammenhang

### C.1.1 Richtlinien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit

#### Stabilitätsgerecht

**Erläuterung** *Stabilitätsgerechtheit* umfasst das Themenfeld der Standsicherheit, sowie der Kipp-, Knick- und Beulgefahr. Sie fußt grundsätzlich auf den Überlegungen des Prinzips der Stabilität (siehe Abschnitt 7.1.2).<sup>1</sup> In der Literatur existiert eine Vielzahl von Berechnungsverfahren zu diesem Themenfeld. An dieser Stelle sei auf Berechnungsbeispiele zur Auslegung gegen Kippen, Knicken und Beulen bei LACKMANN und VILLWOCK<sup>2</sup> verwiesen. Besonders im Leichtbau stellt Stabilitätsversagen eine häufige Versagensform dar. WIEDEMANN gibt einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Versagensmechanismen und deren Berechnung.

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Störgrößen verringern (*A*)

**Beispiel** Tabelle C.1 zeigt eine stabilitätsgerechte Lösungsvariante einer Einstellschraube. Die verbesserte Variante bleibt auch bei kleinen Schwankungen der Stellkraft in ihrer Lage.<sup>3</sup>

---

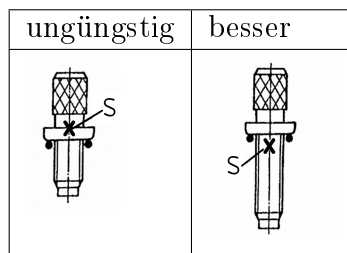
<sup>1</sup>FELDHUSEN ET AL. (2014), S. 376

<sup>2</sup>Vgl. LACKMANN und VILLWOCK (2014), S. 127-132.

<sup>3</sup>Vgl. KOLLER (1998), S. 254.

<sup>4</sup>Quelle: nach KOLLER (1998), S. 254

Tabelle C.1: Ungünstige und verbesserte Gleichgewichtslage.<sup>4</sup>



## C.2 Funktionaler Zusammenhang - Umgang mit Störgrößen

### C.2.1 Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen

#### Ausdehnungsgerecht

**Erläuterung** Im Betrieb können durch Wärmeeinfluss oder mechanische Belastung Längenänderungen auftreten, die unter Umständen zu Zwangskräften oder unvorhersehbarem Bauteilverhalten führen können. Hinweise aus dem Bereich *ausdehnungsgerechtes Gestalten* streben eine Funktionserfüllung unter Längenänderung an. Relativausdehnung zwischen Bauteilen stellt hierbei einen Spezialfall dar. Es wird unterschieden in stationäre und instationäre Relativausdehnung. Feldhusen et al.<sup>5</sup> stellen hierzu Abhilfemaßnahmen vor.

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Störgrößen verringern (*A*), Einwirkung von Störgrößen verringern (*E*), Störgröße reduzieren (*S*)

**Beispiel** Um Zwangskräfte durch die Auswirkung von Wärmedehnung zu vermeiden und eine eindeutige Positionierung von Bauteilen unter Wärmeeinfluss zu wahren, sollten Führungen auf einer Geraden durch den Festpunkt angeordnet werden. Der Festpunkt muss sich dabei auf einer Symmetrielinie des Verzerrungszustandes befinden. Abbildung C.1 zeigt zwei Möglichkeiten zur Lagerung einer runden Scheibe mit von außen nach innen zunehmender Temperatur. Abbildung C.1a zeigt eine Anordnung mit konstruktivem Festpunkt. Abbildung C.1b zeigt eine Anordnung mit fiktivem Festpunkt. Bei beiden Ausführungen liegen Festpunkt und Führungen auf den Symmetrielinien des Verzerrungszustands, der durch das Temperaturfeld gegeben ist.<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 591-597.

<sup>6</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 591; Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 585-597; Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2014), S. 376-377

<sup>7</sup>Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 591

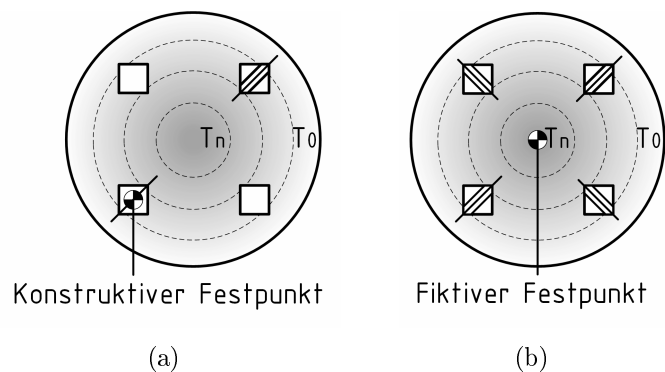


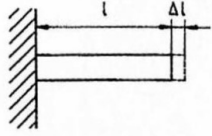
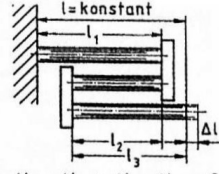
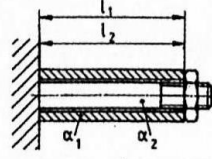
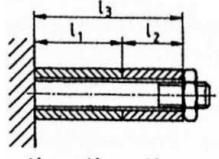
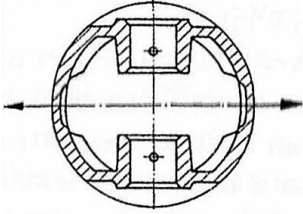
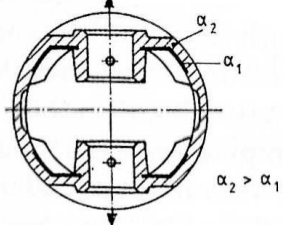
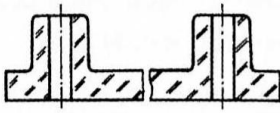
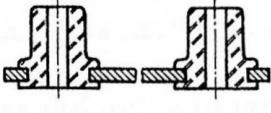
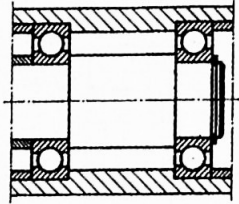
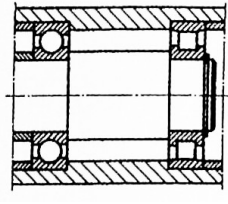
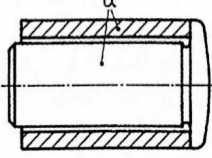
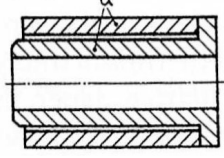
Abbildung C.1: Ausführung mit konstruktivem (a) und fiktivem (b) Festpunkt bei gleichmäßiger Temperaturabnahme von innen nach außen.<sup>7</sup>

Tabelle C.2: Gestaltungshinweise zum *Umgang mit Wärme*

Quelle: HALE (1999), S. 8-84; KOLLER (1998), S. 273-274; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 250-257

| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig | besser |
|------|---|-----------|--------|
| S    | symmetrische Temperaturverteilung in Kombination mit symmetrischer Bauteilgestaltung anstreben  |           |        |
| S    | Wärmequelle beseitigen, reduzieren oder isolieren   |           |        |
| S    | Maschinenbediener (fungiert als Wärmequelle) isolieren  |           |        |
| S    | Wärmequelle konstant halten, um sie zu handhaben  |           |        |
| S    | Raumtemperatur kontrollieren  |           |        |
| E    | Wasserfalleffekt vermeiden: Kühlflüssigkeit direkt zurückleiten, nicht an anderen empfindlichen Bauteilen vorbeileiten  |           |        |
| E    | Maschinenraum/ Maschinenstruktur/ Werkstück isolieren, sodass Temperatur kontrolliert werden kann; Kühlen durch freie/ erzwungene Konvektion mit Luft/ Flüssigkeit oder thermoelektrische Erscheinung |           |        |
| E    | Bauteile vor unzulässigen Spannungen infolge schwankender Temperaturen schützen, Kälteschrumpfspannungen vermeiden  |           |        |
| A    | Spindlewachstum kompensieren  |           |        |
| A    | Temperatur des Messsystems messen, um Abweichung im Messsystem zu kompensieren  |           |        |



|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
| A | Wärmeausdehnung durch Subtraktionsstruktur mit geeigneten Ausdehnungskoeffizienten und Bauteillängen kompensieren                             |  $\Delta l \neq 0$  |  $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_3 - \Delta l_2 = 0$ $\Delta l = \alpha_1 l_1 + \alpha_3 l_3 - \alpha_2 l_2 = 0$   |
| A | relative Wärmeausdehnung von Bauteilen durch Additionsstruktur mit geeigneten Ausdehnungskoeffizienten und Bauteillängen kompensieren         |  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ $\Delta l_1 - \Delta l_2 \neq 0$                        |  $\Delta l_n = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots$ $\alpha_3 l_3 = \alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2$                         |
| A | Wärmedehnung in bestimmten Richtungen verhindern und in andere Richtungen umlenken  |    |  $\alpha_2 > \alpha_1$  |
| A | Wärmeausdehnung mit Material mit geringem Ausdehnungskoeffizienten und der Outsert Technik reduzieren   | $\Delta l = \Delta T \alpha_1 l$  <p>z. B. Kunststoff <math>\alpha_1</math></p> | $\Delta l = \Delta T \alpha_2 l$  <p>z. B. Stahl <math>\alpha_2</math><br/><math>\alpha_2 &lt; \alpha_1</math></p> |
| A | sind Wärmeausdehnungen nicht zu kompensieren, gezielte Ausdehnungsmöglichkeit so vorsehen, dass Funktionseinschränkungen ausgeschlossen sind. |   |    |
| A | Bauteile mit gleichmäßiger Temperaturzu- bzw. abnahme anstreben   |  $\alpha$   |  $\alpha$  |

## Resonanzgerecht

**Erläuterung** Resonanzen können zu unvorhersehbarem Systemverhalten und unter Umständen zu hohen Reaktionskräften und großen Schwingungsamplituden bis zum Versagen führen. Resonanzen können also als Störgröße aufgefasst werden. Eine resonanzgerechte Gestaltung trägt entsprechend zur Beherrschung von Unsicherheit bei.<sup>8</sup>

**Wirkungsweise im RD** Störgröße und Einfluss der Störgröße eliminieren ( $S$ ,  $E$ )

**Beispiel** Abbildung C.2 zeigt den elastischen Anschluss eines Motors mit vier Gummielementen (als Ausschnitt). Hierdurch werden Schwingungen aus dem Antrieb gedämpft und nicht vollständig auf die Struktur übertragen.<sup>9</sup>

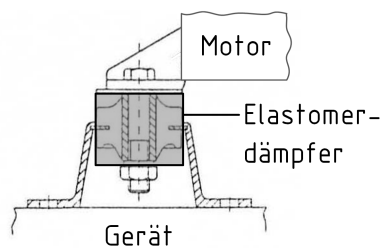
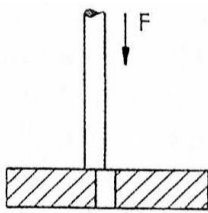
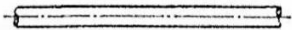
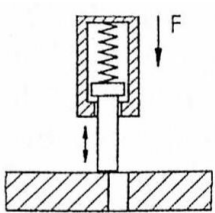
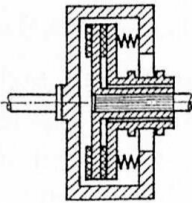


Abbildung C.2: Schwingungsisolierte Aufhängung eines Motors.<sup>10</sup>

Tabelle C.3: Gestaltungshinweise zum Umgang mit *mechanischer Beanspruchung*.  
Quelle: KOLLER (1998), S. 211; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 196

| Ziel | Gestaltungshinweis  | ungünstig  | besser   |
|------|---|--|--|
| A    | Kraft-/Drehmoment mittels elastischer Elemente oder Reibflächen begrenzen | <br> | <br> |

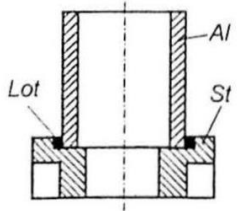
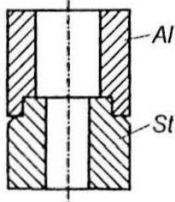
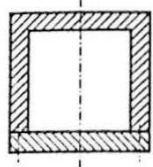
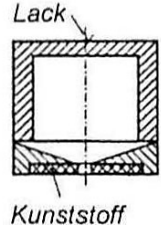
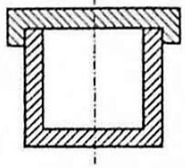
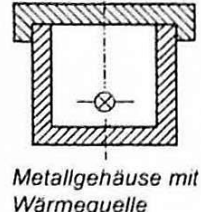
<sup>8</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2014), S. 376

<sup>9</sup>Vgl. KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 280-281; Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2014), S. 376

<sup>10</sup>Quelle: eigene Darstellung nach KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 281

|      |  |
|------|--|
| A    | Methode der Unterlastung durch Überdimensionierung, bzw. Belastungsredundanz   |
| S    | auftretende Beanspruchungsschwankungen einschränken  |
| S, K | Schwankungen des Leistungsvermögens der Elemente durch fertigungstechnische Maßnahmen und geeignete Prüf- und Kontrolltechnologie einschränken |
| S    | sich bewegende Teile vermeiden, sonst günstige Bewegungsart wählen   |

Tabelle C.4: Gestaltungshinweise zum *Umgang mit Feuchte*  
Quelle: KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 269-270

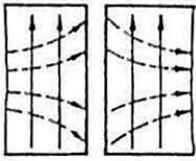
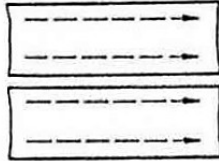
| Ziel    | Gestaltungshinweis   | ungünstig   | besser  |
|---------|--|---|---|
| A, S    | Gefährdete Baugruppen so gestalten, dass sie kurzfristig unter Wasser funktionstüchtig sind und dass das Wasser ungehindert ablaufen kann, zusätzlichen Schutz durch geeignete Überzüge vorsehen   |   |   |
| A, S, E | Bei Gefahr von Kondenswasser, Funktion bei Unterschreiten des Taupunktes sicherstellen; verhindern dass Wasser mit freien Ionen aggressive Medien bildet; Funktionsblöcke mit Kunststoffüberzügen schützen; Form so gestalten, dass Wasser ablaufen kann |  |  |
| E       | durch Wärmeenergie dem Eindringen von Feuchte und dem Unterschreiten des Taupunktes entgegenwirken   |  |  |

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| E | an kritischen Stellen muss Feuchte unter kritischer Größe von 40% liegen   |  |  |
| E | bei extremen Anforderungen Verarbeitung im Vakuum oder unter besonderen Bedingungen, Hermetisieren meist nur durch Verwendung von Metallgehäuse mit Glasdurchführungen |  |  |
| E | bei Strömen an der Oberfläche vor Einwirkung von Staub schützen, Gefahr der Anlagerung von Feuchte   |  |  |
| S | bei normalen Beanspruchungen Durchlüftung vorsehen   |  |  |
| E | Entstehen von Kapillaren, Spalten etc. verhindern  |  |  |

Tabelle C.5: Gestaltungshinweise zur *elektromagnetischen Verträglichkeit*

Quelle: KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 259-263, 348

| Ziel | Gestaltungshinweis   | ungünstig | besser |
|------|--|-----------|--------|
| S    | Störsignal nah an der Quelle abschirmen  |           |        |
| E    | Schirm möglichst schließen, notwendige Öffnungen abdichten und mit geringem Übergangswiderstand versehen |           |        |

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| A | Nahtverbindungen und Fugen sollten für einen ungestörten Feldverlauf im Schirm parallel zu den Feldlinien verlaufen. |  |  |
|---|--|---|---|

## C.3 Faktor Mensch

### C.3.1 Prinzipien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen

#### Prinzip der flexiblen Arbeitsgestaltung

**Erläuterung** Das Prinzip der flexiblen Arbeitsgestaltung berücksichtigt interindividuelle Differenzen. Die Gestaltung einer Maschine oder Arbeitssystems soll demnach die Nutzung durch Menschen mit einem möglichst großen Spektrum an unterschiedlichen Arbeitsweisen und Eigenschaften, wie Konstitution, Disposition, Qualifikationen oder Kompetenzen, ermöglichen. Da eine Ermöglichung der Zugänglichkeit für alle Nutzer häufig den Zeit- und Kostenrahmen übersteigt, werden meist als Vereinfachung die Charakteristiken des Intervalls von 5%-90% der Summenhäufigkeit der voraussichtlichen Nutzer verwendet. <sup>11</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Störgröße reduzieren (A)

**Beispiel** Bei der Gestaltung eines Arbeitsplatzes wie in Abbildung C.3 zeigt sich, dass eine optimale Gestaltung für alle potentiell auftretenden Körpergrößen ohne individuelle Anpassung nicht möglich ist. In der oberen Zeile wird die Geometrie an die "durchschnittliche" Person angepasst, was zu Nachteilen bei "großen" bzw. "kleinen" Personen führt. In der unteren Zeile sind zwei Gestaltungsregeln der Anthropometrie umgesetzt. Dabei orientieren sich die inneren Maße, im Beispiel Abstand und Höhe des Bildschirms, an der "kleinen" Person. Das äußere Maß, im Beispiel die Tischhöhe, wird nach der "großen" Person festgelegt. Höhenunterschiede für kleinere Personen werden mit einem Hocker ausgeglichen. Auf diese Weise wird die Nutzung einer großen Bandbreite an Nutzern ermöglicht.

#### Prinzip der dynamischen Arbeitsgestaltung

<sup>11</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-20 (2009), S. 7; Vgl. SCHLICK ET AL. (2010), S. 70-71; Vgl. SHNEIDERMAN und PLAISANT (2005), S. 74

<sup>12</sup>Quelle: SCHLICK ET AL. (2010), S. 1044.

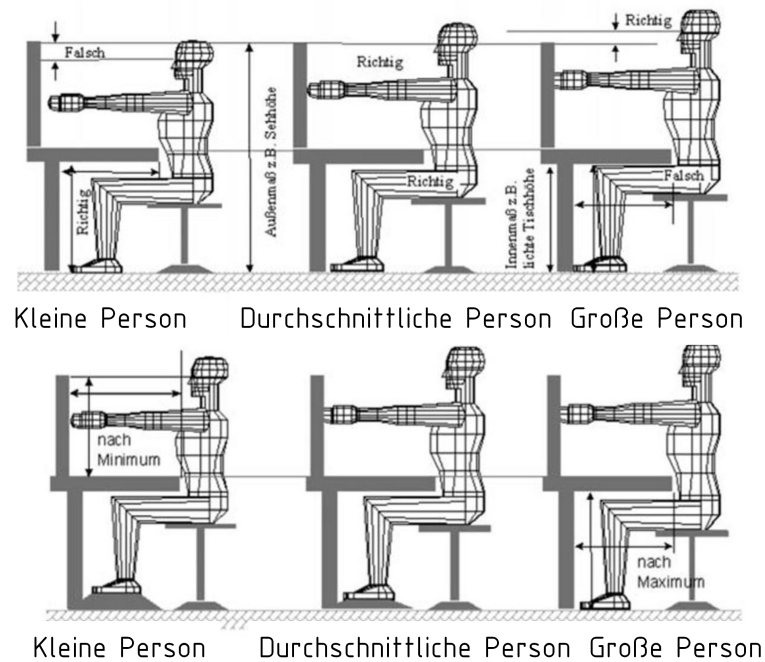


Abbildung C.3: Gestaltung eines Arbeitsplatzes.<sup>12</sup>

**Erläuterung** Das Prinzip der dynamischen Arbeitsgestaltung berücksichtigt intraindividuelle Unterschiede eines Individuums über die Zeit. Sie ergeben sich beispielsweise durch sich ändernde Qualifikationen und Kompetenzen, aber auch durch Unterschiede mit kurzfristigerer Auswirkung, wie schwankende Motivation oder Aufmerksamkeit.<sup>13</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung von Störgröße reduzieren (A), Zukunftsrobustheit (Z)

**Beispiel** Die Menge an benötigten Informationen eines Nutzers ändert sich mit seiner Erfahrung. Neuen Nutzern kann zusätzlich benötigten Informationen in Form einer Anleitung bereitgestellt werden.<sup>14</sup>

## Aufgabenangemessenheit

**Erläuterung** Die Aufgabenangemessenheit gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Ziel ist die optimale Unterstützung des Nutzers bei der Erledigung seiner

<sup>13</sup>Vgl. SCHLICK ET AL. (2010), S. 70-71 .

<sup>14</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 23 .

---

Arbeitsaufgabe. Für die Robustheit eines Systems relevant ist, dass lediglich die Informationen und Dialogschritte angezeigt, bzw. angeboten werden, die für die Aufgabenerfüllung benötigt werden.<sup>15</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren durch Vereinfachen (F)

**Beispiel** Die Vereinfachung eines Dialogs kann erreicht werden, indem unnötige Schritte vermieden werden. So können häufig genutzte Funktionen vom System vorgeschlagen oder automatisiert werden. Beispielsweise bietet Microsoft Word voreingestellte Formatvorlagen an, um die Formatierung zu vereinfachen (siehe Markierung in Abbildung C.4). Auf diese Weise werden einige Schritte zur Einstellung der gewünschten Formatierung eingespart.

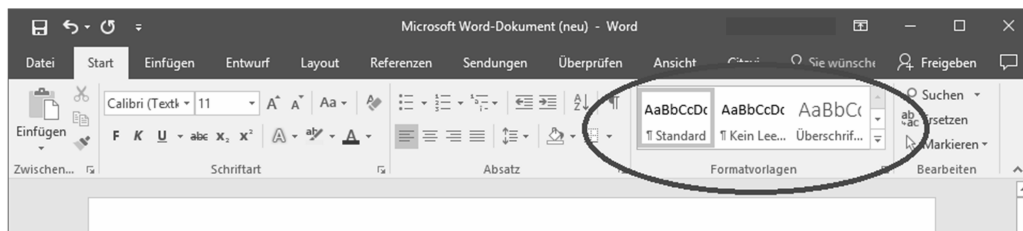


Abbildung C.4: Aufgabenangemessenheit am Beispiel von Formatvorlagen in Microsoft Word.<sup>16</sup>

## Selbstbeschreibungsfähigkeit

**Erläuterung** Die Selbstbeschreibungsfähigkeit gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Sie zielt darauf ab, dass an jeder Stelle des Dialogs offensichtlich ist, welche Handlung wie unternommen werden soll. Für die Robustheit relevant ist das Anzeigen der notwendigen Informationen für eine Entscheidung und eine eindeutige Gestaltung des Dialogs.<sup>17</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren durch Eindeutigkeit (F, V)

**Beispiel** Dialoge sind dann selbstbeschreibungsfähig, wenn ihre gewollte Interaktion für den Nutzer offensichtlich ist. In Abbildung C.5 ist ein Screenshot von Microsoft Word abgebildet. Die Optionen für die Textausrichtung (in der Abbildung rot markiert) werden symbolhaft auf ihren Schaltflächen dargestellt. Zusätzlich dazu wird eine ausführliche Information bereitgestellt, wenn der Mauszeiger über der Schaltfläche positioniert wird.

<sup>15</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 8-10 .

<sup>16</sup>Quelle: Screenshot von Microsoft Word.

<sup>17</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 10 .

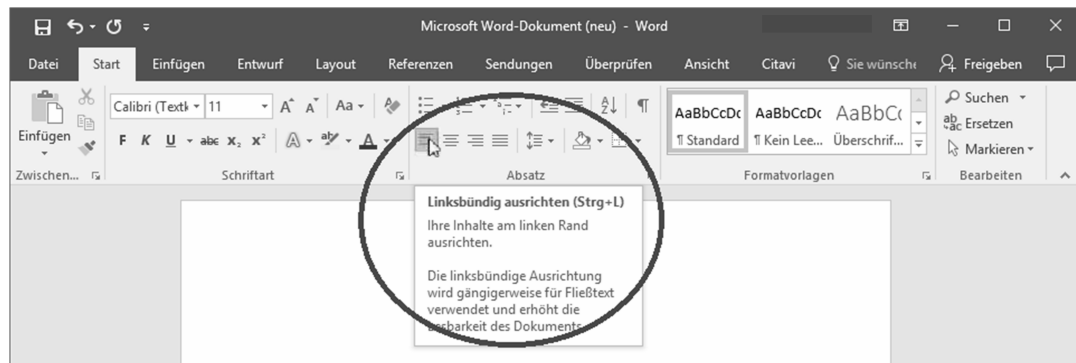


Abbildung C.5: Selbstbeschreibungsfähigkeit anhand der Textausrichtung in *Microsoft Word*.<sup>18</sup>

## Erwartungskonformität

**Erläuterung** Die Erwartungskonformität gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Sie sieht vor, dass der Dialog den vorhersehbaren Nutzerbelangen bzw. allgemeinen Konventionen entspricht. Für die Robustheit relevant ist, dass die Sprache und das Format den Kenntnissen des Nutzers entspricht.<sup>19</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkung durch unterschiedliche Nutzer reduzieren/eliminieren (A)

**Beispiel** Erwartungskonformität bezieht sich auch auf Verschiedene Versionen von Software. Der Programmstart ist in allen Windows Versionen über das Startmenü möglich. Aufbau und Position sind ebenfalls über die Versionen konstant. Eine Ausnahme bildet Windows 8, wo der Start-Button entfernt wurde und der Aufbau des Startmenüs geändert wurde, dargestellt in Abbildung C.6. Der Bruch gegen die Erwartungshaltung führte zu großer Kritik und Widerstand bei den Nutzern. Die neueste Version, Windows 10, entspricht wieder dem bekannten Muster.

## Lernförderlichkeit

**Erläuterung** Die Lernförderlichkeit gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Dabei werden das Erlernen und Nutzen eines interaktiven Systems unterstützt bzw. angeleitet. Für die Robustheit relevant ist es dem Nutzer zu ermöglichen, Dialogschritte ohne nachteilige Auswirkungen zu wiederholen.<sup>20</sup>

<sup>18</sup>Quelle: Screenshot von Microsoft Word.

<sup>19</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 11-12 .

<sup>20</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 12-13 .





Abbildung C.6: Erwartungskonformität anhand des Betriebssystems *Windows*.

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten in der Zukunft reduzieren ( $F, Z$ ), Auswirkung von Störgrößen reduzieren ( $A$ )

**Beispiel** Durch die Möglichkeit Funktionen auszuprobieren, ohne dass nachteilige Auswirkungen entstehen, wird erreicht, dass die genaue Wirkungsweise der Funktion dem Nutzer bekannt ist. Auf diese Weise werden in Zukunft weniger Fehler bei der Anwendung auftreten. Eine Möglichkeit, diesen Grundsatz umzusetzen, ist die Implementierung einer *Rückgängig-Funktion*. In Abbildung C.7 sind einige Beispiele von Softwaretools aufgeführt.

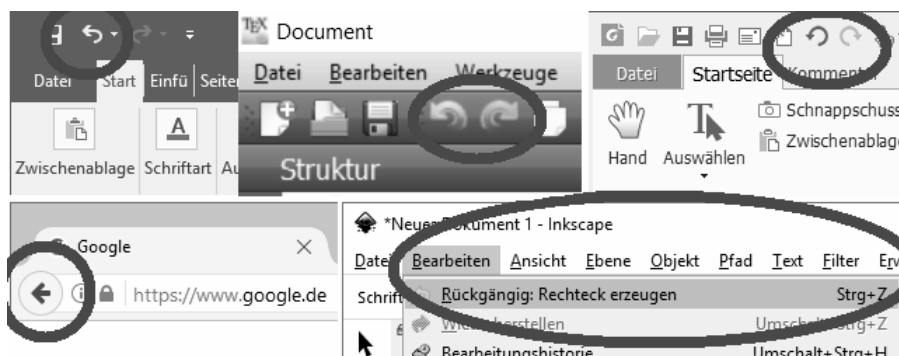


Abbildung C.7: "Rückgängig"Funktion am Beispiel von Microsoft Excel, Texmaker, Foxit Reader, Firefox, Inkscape.

## Fehlertoleranz

**Erläuterung** Die Fehlertoleranz gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Durch fehlertolerante Gestaltung wird das Arbeitsergebnis durch fehlerhafte Ein-

gabe mit keinem oder geringem Korrekturaufwand erreicht. Die Mittel sind Fehlererkennung, Fehlervermeidung, Fehlerkorrektur und Fehlermanagement.<sup>21</sup>

**Wirkungsweise im RD** Auswirkungen durch Fehler des Bedieners reduzieren/eliminieren (A)

**Beispiel** Sind häufige Fehler bekannt, kann das System die Eingabe auf Korrektheit überprüfen und so Fehler vermeiden. So durchsuchen viele E-Mail-Programme die Nachrichten vor dem Absenden auf Wörter wie *Anhang* oder *anbei* und kontrollieren, ob eine Datei angehängt wurde. Wenn nicht erscheint eine Mitteilung, ob die E-Mail tatsächlich ohne Anhang abgesendet werden soll. Die Handlung kann nun korrigiert werden oder bewusst durch den Nutzer bestätigt werden. Der Nutzer wird dadurch außerdem auf seinen Fehler aufmerksam gemacht, bevor die Eingabe verarbeitet wurde.

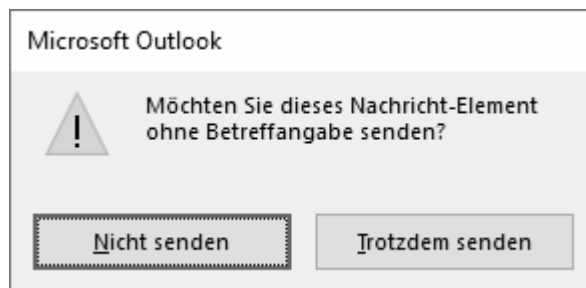


Abbildung C.8: Fehlertoleranz durch Fehlervermeidung.

## Individualisierbarkeit

**Erläuterung** Die Individualisierbarkeit gehört zu den sieben Grundsätzen der Dialoggestaltung. Gefordert wird, dass der Nutzer die Möglichkeit hat, die Interaktion oder Darstellung zu ändern oder anzupassen. Für die Robustheit relevant die Anpassungsfähigkeit eines Systems an unterschiedliche Nutzer.<sup>22</sup>

**Wirkungsweise im RD** negative Auswirkung durch unterschiedliche Nutzer reduzieren/eliminieren (A)

**Beispiel** Textprogramme wie *Microsoft Word* bieten für viele Funktionen verschiedene Wege an, die je nach Kenntnisstand des Nutzers verwendet werden können. In Abbildung C.9 sind zwei Optionen für die Funktion *Kopieren* angezeigt, zum einen als Menü-Option

---

<sup>21</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 14-15 .

<sup>22</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 16-17 .

und zum anderen als Symbol. Eine weitere Möglichkeit besteht durch die Verwendung des Tastaturkürzels *STRG-C*.

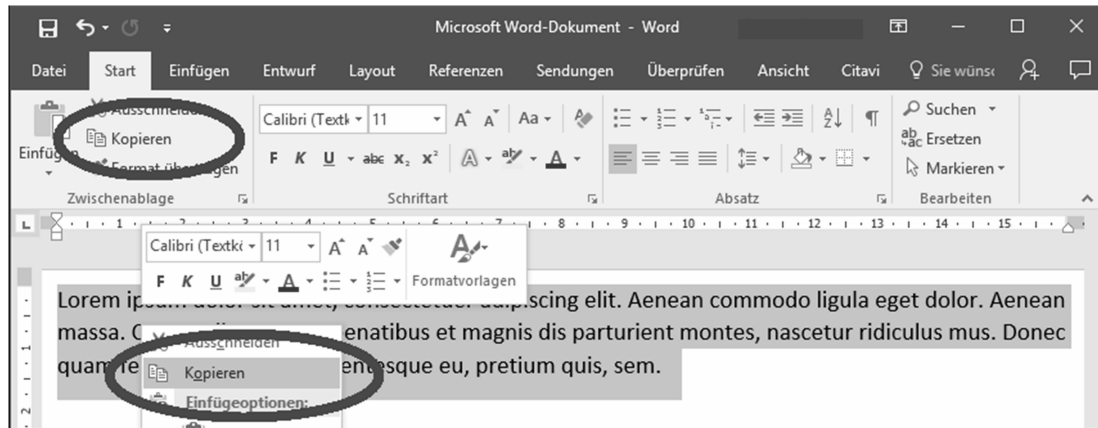


Abbildung C.9: Individualisierbarkeit durch verschiedene Optionen für die Funktion *Kopieren*.

## Entdeckbarkeit

**Erläuterung** Die Entdeckbarkeit ist einer der sechs Grundsätze der Informationsdarstellung. Er fordert die Darstellung von Informationen, sodass sie als vorhanden erkannt werden. Für die Robustheit relevant ist die Erregung der Aufmerksamkeit und die zeitliche Darstellung der Informationen. Auf diese Weise werden Fehler durch den Anwender vermieden.<sup>23</sup>

**Wirkungsweise im RD** Störgröße "Mensch" reduzieren, eliminieren (S), Fehlermöglichkeiten reduzieren (F)

**Beispiel** Um die Aufmerksamkeit des Anwenders auf wichtige Informationen zu lenken können diese beispielsweise auf einer Seite oben mittig dargestellt werden sowie durch größere, fett oder kursiv gedruckte Schrift hervorgehoben werden.<sup>24</sup>

## Unterscheidbarkeit

**Erläuterung** Die Unterscheidbarkeit ist einer der sechs Grundsätze der Informationsdarstellung. Dabei wird die Unterscheidbarkeit und Zuordnung von einzelnen Elementen

<sup>23</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 13-15 .

<sup>24</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 13 .

und Gruppen von Elementen unter- bzw. zueinander gefordert. Dieser Grundsatz geht mit den Zielen einer eindeutigen Gestaltung nach FELDHUSEN ET AL. (2013) einher.<sup>25</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit durch eindeutige Informationsdarstellung (V)

**Beispiel** Um einzelne Elemente einander zuzuordnen oder voneinander unterscheiden zu können, können die Gestaltgesetze der Ähnlichkeit oder der Nähe angewendet werden. Sie basieren darauf, dass ähnliche Elemente, bzw. nahe beieinander liegende Elemente zu einer Gruppe zusammengefasst werden. In Abbildung C.10 (a) werden die Zeilen anhand der Farbgebung gebildet, obwohl der Abstand zwischen allen Quadraten identisch ist. In (b) werden jeweils vier Quadrate, die räumlich nahe liegen, gedanklich zu einer Einheit zusammengefasst, obwohl alle dieselbe Farbe aufweisen. Im Umkehrschluss dazu kann ein physischer oder zeitlicher Abstand genutzt werden, um Elemente zu trennen.

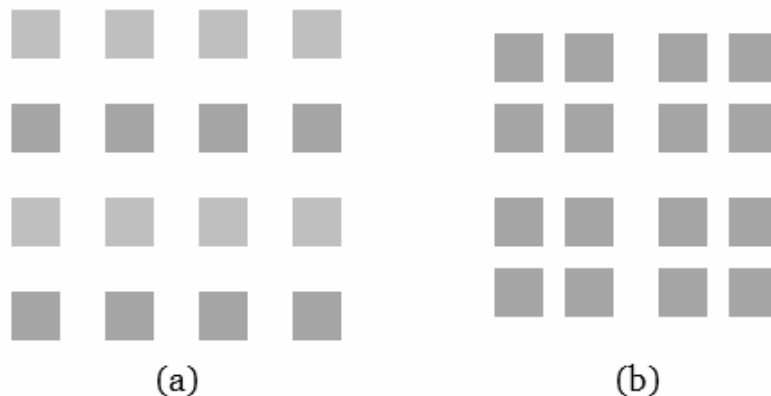


Abbildung C.10: Gestaltgesetz der Ähnlichkeit (a) und der Nähe (b)<sup>26</sup>

### Eindeutigkeit (eindeutige Interpretierbarkeit)

**Erläuterung** Die Eindeutigkeit ist einer der sechs Grundsätze der Informationsdarstellung. Die Darstellung von Informationen ist dann eindeutig, wenn sie vom Nutzer bestimmungsgemäß verstanden werden. Dieser Grundsatz geht mit den Zielen einer eindeutigen Gestaltung nach FELDHUSEN ET AL. (2013) einher.<sup>27</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit durch eindeutige Informationsdarstellung (V)

---

<sup>25</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 17-19 .

<sup>26</sup>Quelle: eigene Darstellung nach KRÜGER ET AL. (2016), S. 39-40.

<sup>27</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 20-22 .

---

**Beispiel** Die korrekte Interpretation von Abkürzungen, Symbolen und Metaphern wird zum Beispiel erreicht, indem gängige Konventionen der Nutzergruppe eingehalten werden. Bei Akronymen sollte bei ihrer ersten Verwendung die vollständige Wortfolge angegeben werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die ausgeschriebene Wortfolge anzuzeigen, wenn die Maus über dem Akronym positioniert wird.<sup>28</sup>

## Kompaktheit

**Erläuterung** Die Kompaktheit ist einer der sechs Grundsätze der Informationsdarstellung. Ziel ist, lediglich die für die Aufgabenerfüllung notwendigen Informationen darzustellen und Aktionen so einfach wie möglich zu gestalten. Dieser Grundsatz geht mit den Zielen einer einfachen Gestaltung nach FELDHUSEN ET AL. (2013) einher.<sup>29</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren durch einfache Informationsdarstellung (*F*)

**Beispiel** Die Kompaktheit wird erreicht, indem die angebotene Information auf ein Minimum beschränkt wird und zusätzliche Informationen weggelassen werden. Die überflüssige Information kann dabei nicht nur visuell in Form von übermäßigem Wortreichtum vorliegen sondern beispielsweise auch durch unnötige Hintergrundmusik.<sup>30</sup>

## Konsistenz (interne und externe)

**Erläuterung** Die Konsistenz (interne und externe) ist einer der sechs Grundsätze der Informationsdarstellung. Die Konsistenz ist dann gewahrt, wenn ähnliche Elemente einander ähnlich und unterschiedliche Elemente in unterschiedlichem Stil oder Format dargestellt sind. Die Konsistenz muss im gesamten interaktiven System durchgängig eingehalten werden.<sup>31</sup>

**Wirkungsweise im RD** Standardisierung der Informationsdarstellung (*Ei*)

**Beispiel** Terminologie und Bezeichnungen sollten im gesamten System konsistent verwendet werden. Dies gilt auch für die Bezeichnung von Verknüpfungen. So sollte eine Verknüpfung "Hilfe" nicht auf eine Seite mit dem Titel "Information", sondern mit dem "Hilfe" führen.<sup>32</sup>

---

<sup>28</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 20 .

<sup>29</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 23-24 .

<sup>30</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 23 .

<sup>31</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 24-25 .

<sup>32</sup>Vgl. DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 24 .

## **Einschränkung**

**Erläuterung** Durch vorgegebene Einschränkungen können Handlungen geleitet oder die Interpretation von Informationen vereinfacht werden. Realisiert werden können diese z. B. durch physikalische, logische, semantische oder kulturelle Einschränkungen. Auf diese Weise wird Fehlern vorgebeugt.

<sup>33</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren ( $F$ ), Störgröße reduzieren/eliminieren ( $S$ )

**Beispiel** Eine weltweite Konvention ist, dass Schrauben rechtsdrehend öffnen. Eine Ausnahme bilden Gasflaschen mit brennbaren Gasen, die nach links öffnen. Auf diese Weise wird verhindert, dass durch ein Vertauschen von Gasflaschen ein Sicherheitsrisiko entsteht, da die Anschlüsse nicht kompatibel sind.

## **Mapping**

**Erläuterung** Mapping bezeichnet die optimale Beziehung zwischen Bedienelementen und Darstellung und ihrer Auswirkung. Umgesetzt werden kann dieses Prinzip durch eine geeignete räumliche Anordnung oder zeitliche Kontinuität. <sup>34</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit des Verhaltens ( $V$ )

**Beispiel** In Räumen mit mehreren Leuchtquellen gibt es häufig eine Leiste von nicht eindeutig zurechenbaren Lichtschaltern. Eine Zuordnung erfolgt dann durch Ausprobieren. Der Lichtschalter in Abbildung C.11 kann beschriftet werden. Diese Möglichkeit wurde jedoch nur teilweise genutzt, sodass lediglich die Funktion des untersten Schalters eindeutig erkennbar ist.

## **Affordance**

**Erläuterung** Die Affordance bezeichnet die angebotene Gebrauchseigenschaft. Durch die Affordance wird die vorhergesehene Verwendung kommuniziert und ist daher die Grundlage für eine intuitiv richtige Benutzung von Gegenständen. Die Interpretation der Affordance ist erlernt und wird durch kulturelle Konventionen bestimmt. <sup>35</sup>

---

<sup>33</sup>Vgl. NORMAN (2013), S. 72 .

<sup>34</sup>Vgl. NORMAN (2013), S. 72 .

<sup>35</sup>Vgl. NORMAN (2013), S. 72, 145.



Abbildung C.11: Lichtschalter mit uneindeutiger Zuordnung zu Leuchten.

#### **Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit des Verhaltens (*V*)

**Beispiel** Die Affordance einer Tür ist, dass sie geöffnet werden kann. Dazu haben Türen normalerweise Griffe, Knäufe oder ähnliches. Eine weitere Möglichkeit für Schränke oder Schubladen bieten sogenannte Drucktüröffner. Zugunsten eines minimalistischen Designs weist die Front dabei keinen Hinweis auf, wie die Tür geöffnet wird. Die Affordance dieser Drucktüröffner ist nicht offensichtlich, der Nutzer muss die korrekte Verwendung erst erlernen.



Abbildung C.12: Affordance am Beispiel von Drucktüröffnern.<sup>36</sup>

#### **Conceptual Model gezielt nutzen**

<sup>36</sup>Quelle: [http://www.ikea.com/ms/de\\_DE/campaigns/besta.html](http://www.ikea.com/ms/de_DE/campaigns/besta.html), aufgerufen am 03.03.2017.

**Erläuterung** Die Gestaltung nutzt das Conceptual Models des Nutzers vom Systems, sodass die Entdeckbarkeit und die Beurteilung der Ergebnisse vereinfacht wird.<sup>37</sup>

**Wirkungsweise im RD** Fehlermöglichkeiten reduzieren (*F*)

### **Signifier/ Anzeiger einsetzen**

**Erläuterung** Der effektive Einsatz von Anzeigern sichert die Entdeckbarkeit und ein verständliches Feedback.<sup>38</sup>

**Wirkungsweise im RD** Vorhersagbarkeit des Verhaltens (*V*), Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit (*F*)

## **C.3.2 Richtlinien zum Umgang mit Unsicherheit in Zusammenhang mit dem Menschen**

### **Ergonomiegerecht**

**Erläuterung** Der Mensch ist in der Interaktion mit technischen Systemen ein großer Unsicherheitsfaktor. Daher muss bei der Entwicklung von Systemen die mit dem Menschen im Austausch stehen auf die Besonderheiten des Menschen eingegangen werden. Ausgenommen von diesen Betrachtungen sind im Rahmen dieser Arbeit explizit Maßnahmen zur Reduktion der Gefährdung des Menschen (bspw. Grundregel *sicher*) und Maßnahmen die unter die Erhöhung der *User Experience* (*UX*) fallen. Beide Bereiche der Gestaltung sind von Bedeutung für den Erfolg von technischen Systemen, jedoch nicht im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung. Des weiteren befasst sich diese Arbeit nicht mit dem Menschen selber, sondern nur mit produktseitigen Maßnahmen, die es dem Menschen ermöglichen unter allen Umständen mit dem System zu interagieren und so das Ergebnis des Einsatzprozesses möglichst unabhängig vom Menschen zu machen.<sup>39</sup> Die Konstruktionshinweise zur Beherrschung von Unsicherheit aus dem Zusammenhang der Nutzerinteraktion dienen vor allem der Reduktion von Fehlermöglichkeiten, werden jedoch auch durch Reduktion der Komplexität und gezielter Verwendung von bekannten mentalen Modellen eingesetzt.

**Wirkungsweise im RD** Reduktion von Fehlern (*F*), Standardisieren (*Ei*)

---

<sup>37</sup>Vgl. NORMAN (2013), S. 72 .

<sup>38</sup>Vgl. NORMAN (2013), S. 72 .

<sup>39</sup>Aus ethischen Gründen wird der Mensch im Rahmen des *SFB 805* nicht als Störgröße verstanden.



**Beispiel** Technische Systeme sollten die Interaktionsmöglichkeiten mit dem System nicht unnötig beschränken. Steckverbindungen zur Signalleitung im Elektronikbereich sind hierfür ein gutes Beispiel, vgl. Abbildung C.13. Der *USB Anschluss* hat sich als Standard weltweit durchgesetzt. Dennoch ist seine Gestalt sehr ungünstig gewählt. Obwohl die Außenkontur des *USB Anschlusses* vollständig symmetrisch ist, ist die Anordnung im Inneren dies nicht. In der Folge kann der *USB Stecker* nur in einer möglichen Position eingesteckt werden, obwohl die Außenkontur erkennbar zwei Lagen ermöglicht. Dies führt regelmäßig zu Schwierigkeiten beim Anschluss. NORMAN, S. 127 wirft deshalb die Frage auf „Why aren’t all these devices [Schließsysteme, elektronische Steckverbindungen] orientation insensitive?“

Der *Lightning Anschluss* von Apples *iPhone* hingegen ist ein Positivbeispiel für eine Steckverbindung, vgl. Abbildung C.13b. Er ist vollständig symmetrisch aufgebaut. Die Außenkontur lässt zwei Einbaulagen zu, die beide die Funktion erfüllen. Entsprechend werden Fehler bei der Positionierung des Steckers vermieden.

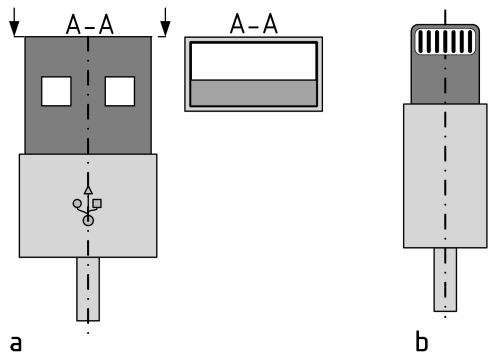


Abbildung C.13: Beispiele für elektronische Steckverbindungen. Links: *USB*. Rechts: *Lightning*.

Tabelle C.6: Allgemeine Hinweise zur *ergonomischen Gestaltung*

Quelle: SHNEIDERMAN und PLAISANT (2005), S. 74-75

| Ziel | Gestaltungshinweis                             |
|------|--|
| Ei   | Konsistenz anstreben                           |
| B, S | auf universale Anwendbarkeit abzielen          |
| F    | Fehler vorbeugen                               |
| Z    | einfach Umkehrung von Aktionen erlauben        |
| S, F | Belastung des Kurzzeitgedächtnisses reduzieren |

Tabelle C.7: Hinweise zur *Dialoggestaltung*

Quelle: DIN EN ISO 9241-110 (2008), S. 8-17

| Ziel                                | Gestaltungshinweis  |
|-------------------------------------|---|
| <b>Aufgabenangemessenheit</b>       |   |
| Ei                                  | Der Dialog sollte dem Benutzer solche Informationen anzeigen, die im Zusammenhang mit der erfolgreichen Erledigung der Arbeitsaufgabe stehen.   |
| Ei                                  | Der Dialog sollte dem Benutzer keine Informationen anzeigen, die nicht für die erfolgreiche Erledigung relevanter Arbeitsaufgaben benötigt werden.  |
| Ei                                  | Die vom interaktiven System verlangten Dialogschritte sollten zum Arbeitsablauf passen, d. h., notwendige Dialogschritte sollten enthalten sein und unnötige Dialogschritte sollten vermieden werden. |
| <b>Selbstbeschreibungsfähigkeit</b> |   |
| F                                   | Die bei jedem Dialogschritt angezeigten Informationen sollten den Benutzer leiten, den Dialog erfolgreich abzuschließen.  |
| V                                   | Dialoge sollten so gestaltet sein, dass die Interaktion für den Benutzer offensichtlich ist.  |
| <b>Erwartungskonformität</b>        |   |
| A                                   | Das interaktive System sollte das Vokabular verwenden, das dem Benutzer bei der Ausführung der Arbeitsaufgabe vertraut ist oder von ihm auf Grund seiner Kenntnisse und Erfahrungen verwendet wird.   |
| A                                   | Formate sollten geeigneten kulturellen und sprachlichen Konventionen entsprechen.   |
| <b>Lernförderlichkeit</b>           |   |
| A                                   | Falls es zu den Arbeitsaufgaben und den Lernzielen passt, sollte das interaktive System dem Benutzer erlauben, Dialogschritte ohne nachteilige Auswirkungen neu auszuprobieren.                       |
| <b>Fehlertoleranz</b>               |   |
| K                                   | Das interaktive System sollte den Benutzer dabei unterstützen, Eingabefehler zu entdecken und zu vermeiden.   |
| A                                   | Das interaktive System sollte verhindern, dass irgendeine Benutzer-Handlung zu undefinierten Systemzuständen oder zu Systemabbrüchen führen kann.   |
| A, Z                                | Wenn sich ein Fehler ereignet, sollte dem Benutzer eine Erläuterung zur Verfügung gestellt werden, um die Beseitigung des Fehlers zu erleichtern.   |
| A                                   | Aktive Unterstützung zur Fehlerbeseitigung sollte dort, wo typischerweise Fehler auftreten, zur Verfügung stehen.   |
| S                                   | Die Prüfung auf Gültigkeit und Korrektheit von Daten sollte stattfinden, bevor das interaktive System die Eingabe verarbeitet.  |
| F                                   | Die zur Fehlerbehebung erforderlichen Schritte sollten minimiert sein.  |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| S                             | Falls sich aus einer Benutzerhandlung schwerwiegende Auswirkungen ergeben können, sollte das interaktive System Erläuterungen bereitstellen und Bestätigung anfordern, bevor die Handlung ausgeführt wird. |
| <b>Individualisierbarkeit</b> |  |
| A                             | Der Umfang von Erläuterungen (z. B. Details in Fehlermeldungen, Hilfeinformationen) sollte entsprechend dem individuellen Wissen des Benutzers veränderbar sein.   |
| A                             | Der Benutzer sollte die Möglichkeit haben, das Niveau und die Methoden der Mensch-System-Interaktion so auszuwählen, dass sie am besten seinen Bedürfnissen entsprechen.                                   |

Tabelle C.8: Hinweise zur *Informationsdarstellung*

Quelle: DIN EN ISO 9241-112 (2015), S. 13-25

| Ziel                      | Gestaltungshinweis  |
|---------------------------|---|
| <b>Entdeckbarkeit</b>     |   |
| S                         | Die Aufmerksamkeit des Benutzers sollte auf die geforderte Information gerichtet sein.  |
| S                         | Der Schwerpunkt der Aufmerksamkeit sollte auf wichtigen Informationen liegen.   |
| S                         | Die wichtigste Information (einschließlich entscheidender Elemente) sollte gegenüber anderen dargestellten Informationselementen hervorgehoben werden, um die Aufmerksamkeit des Benutzers zu sichern.  |
| S                         | Informationen sollten in einem Tempo dargestellt werden, das für das Tempo des Benutzers angemessen ist.  |
| <b>Unterscheidbarkeit</b> |   |
| Ei                        | Informationen sollten entsprechend dem semantischen Ansatz, der für ihre Verwendung am besten geeignet ist einheitlich strukturiert werden.   |
| Ei                        | Zusätzlich zur Strukturierung von Informationen auf einem einzigen Bildschirm umfasst die Strukturierung auch die Verknüpfung von Informationen zwischen verschiedenen Darstellungen auf einem einzigen Bildschirm (z. B. verschiedene Webseiten) und zwischen verschiedenen Wiedergabeeinrichtungen. |
| F                         | Elemente von Informationen, die logisch voneinander verschieden sind, sollten verschiedenartig dargestellt werden (z. B. durch Verwendung verschiedener Darstellungsattribute), um ihre Unterschiede deutlich zu machen.  |
| F                         | Informationen sollten in Gruppen dargestellt werden, die als voneinander verschieden erkannt werden können.   |

|   |  |
|---|--|
| F   | Wenn große Informationsmengen dargestellt werden, darf eine Strukturierung und Sortierung der Informationen erfolgen, damit einzelne Elemente der Information und Gruppen von Informationen leichter voneinander getrennt werden können  |
| Ei  | Elemente von Informationen, die zusammen gehören, sollten in physischer/zeitlicher Nähe zueinander dargestellt werden  |
| Ei  | Elemente von Informationen mit ähnlichen Eigenschaften sollten in physischer/zeitlicher Nähe zueinander dargestellt werden   |
| V   | Physische und/oder zeitliche Abstände sollten zur Trennung von Informationen angewendet werden.  |
| Ei  | Elemente von Informationen (einschließlich Steuerelemente), die logisch ähnlich sind, sollten durch Verwendung ähnlicher Attribute dargestellt werden, um die Aufmerksamkeit auf ihre Ähnlichkeit zu lenken.   |
| F   | Elemente von Informationen (einschließlich Steuerelemente), die logisch verschieden sind, sollten durch Verwendung unterschiedlicher Attribute dargestellt werden, um die Aufmerksamkeit auf ihre Unterschiede zu lenken.  |
| Ei  | Elemente in einer Gruppe von Informationen, die geordnet sind, sollten durch Verwendung von einem oder mehrerer verschiedener Attribute dargestellt werden, die eine natürliche Ordnung implizieren, damit es für die Benutzer einfacher wird, sich bezüglich der vorangegangenen oder folgenden Informations-elemente zu orientieren. |
| <b>Eindeutigkeit (eindeutige Interpretierbarkeit)</b> |  |
| V   | Die dargestellte Information sollte eindeutig sein.  |
| A   | Die beabsichtigte Bedeutung der Information sollte der Bedeutung entsprechen, die vom Benutzer verstanden wird.  |
| Ei  | Wenn möglich sollten einfache linguistische Konstruktionen und Wortbildungen verwendet werden.   |
| A   | Die Bedeutung von Abkürzungen, Akronymen, Symbolen und Symbolik (einschließlich Metaphern) sollte dem Benutzer klar sein.  |
| Ei  | Elemente von Informationen sollten semantisch verschieden voneinander sein.  |
| Ei  | Es sollten möglichst kurze Sätze verwendet werden.   |
| Z   | Obwohl die Wahl der Hauptmodalität und –medien für die Mehrheit der Benutzer die größte Wirkung hat, sollte das System sicherstellen, dass der gesamte Inhalt und alle Funktionen für Hilfstechiken zur Verfügung stehen.  |
| A   | Informationen sollten in einer oder mehreren Modalitäten/Medien/Formaten (Format) dargestellt werden, um die Zugänglichkeitsbedürfnisse verschiedener Benutzer zu unterstützen (z. B. Alt-Text).   |
| A   | Informationen sollten in der Terminologie und Sprache der Fachrichtung des Benutzers dargestellt werden.   |

|   |  |
|---|--|
| F, S  | <p>Die kognitive Beanspruchung kann verringert werden durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Konzentration auf das/die Ziel(e) und Aufgabe(n) auf eindeutig</li> <li>b) Verringerung der Aufgabenanforderungen für den Benutzer;</li> <li>c) Bereitstellung von Strategien für den Benutzer zur Erreichung der Ziele und Erfüllung der Aufgaben;</li> <li>d) Unterstützung bei der Erfüllung der Aufgabe(n) des Benutzers;</li> <li>e) Bereitstellung aller notwendigen Informationen auf eindeutige Art und Weise;</li> <li>f) Verringerung der Gedächtnisanforderungen;</li> <li>g) Bereitstellung der Informationen in einer Weise, die den Bedürfnissen der einzelnen Benutzer am besten entspricht (z. B. Individualisierung auf der Grundlage gespeicherter Präferenzen des Benutzers).</li> </ul> |
| <b>Kompaktheit</b>  |  |
| S   | Minimalismus und Einfachheit sollten angewendet werden, damit keine überflüssigen Stördaten vorhanden sind   |
| S   | Bei der Darstellung sollten überflüssige Informationen vermieden werden (z. B. übermäßiger Wortreichtum, unnötige optische Attribute, unnötige Hintergrundmusik, unnötige taktile Reize).  |
| S   | Der Benutzer sollte die geringstmögliche Informationsmenge gezeigt bekommen, die zum Zeitpunkt der Interaktion benötigt wird.  |
| S   | Zusätzliche Informationen, die die Aufgaben des Benutzers nicht unterstützen, sollten vermieden werden.  |
| S   | Überflüssige Informationen sollten auf ein Mindestmaß verringert werden, sofern sie nicht das Verständnis unterstützen   |
| S, F  | Kognitive Komplexität sollte gering gehalten werden.   |
| Ei  | Das System sollte für die Benutzer möglichst vereinfachte Operationen bereitstellen (Tastenkombinationen, teilweise Automatisierung wie z. B. Textvervollständigung, Verwendung vorkonfigurierter Masken), bei denen Standardeinstellungen angewendet werden, und auch vollständigere Operationen, die es den Benutzern ermöglichen, alle vom Benutzer festlegbaren Werte der Operation zu steuern.  |
| <b>Der Grundsatz der Konsistenz (interne und externe)</b> |  |

|    |  |
|----|--|
| Ei | Terminologie sollte im gesamten interaktiven System durchgängig verwendet werden, einschließlich der Terminologie für:<br>a) Objektbezeichnungen;<br>b) Klassen von Objekten;<br>c) Aktionen und Ereignisse;<br>d) Bezeichnungen für Befehle/Steuerelemente;<br>e) Steueroptionen und -attribute;<br>f) Abkürzungen;<br>g) Anweisungen und Eingabeaufforderungen;<br>h) Rückmeldungen und Fehlermeldungen;<br>i) Statusberichte. |
| Ei | Wenn benannte Wahlmöglichkeiten (z. B. Verknüpfungen) zu Informationsteilen führen (z. B. gesonderte Abschnitte oder Webseiten), sollte die Bezeichnung der ursprünglichen Auswahlmöglichkeit (z. B. Verknüpfung) dieselbe sein wie die Bezeichnung des Informationsteils (z.B. Abschnitt oder Webseite), zu dem diese Wahlmöglichkeit führt.  |
| Ei | Wenn Attribute zur Verschlüsselung von Eigenschaften von Informationsteilen verwendet werden, sollten sie im gesamten interaktiven System durchgängig verwendet werden, oder zumindest innerhalb eines einzelnen Status des interaktiven Systems.  |
| Ei | Das grammatische Format (z. B. die Zeitform des Verbs) ähnlicher Elemente von Informationen sollte konsistent sein.  |
| Ei | Maßeinheiten sollten innerhalb eines interaktiven Systems konsistent sein, und wenn sie geändert werden können, sollten diese Änderungen im gesamten interaktiven System erfolgen.   |
| Ei | Die Bedeutung von Gesten sollte im gesamten interaktiven System konsistent sein.   |
| Ei | Das Verhalten von Bestandteilen sollte im gesamten interaktiven System konsistent sein.  |
| Ei | Die relative Lage und Ausführung verschiedener Gruppen von Benutzungsschnittstellen-Elementen sollte im gesamten interaktiven System konsistent sein.  |
| Ei | Die Operationen von Benutzungsschnittstellen-Elementen sollten innerhalb eines einzelnen Status eines interaktiven Systems konsistent sein. Wenn verschiedene Operationen für verschiedene Status angemessen sind, sollten dem Benutzer Informationen zum aktuellen Status zur Verfügung gestellt werden.  |
| Ei | Die Ergebnisse einer Individualisierungsaktion sollten:<br>a) ein konsistentes Verhalten innerhalb des gesamten interaktiven Systems zeigen;<br>b) mit dem Nutzungskontext der Individualisierung konsistent sein.   |

---

|    |   |
|----|---|
| Ei | Die Informationsdarstellung sollte bestehenden Konventionen folgen.   |
| Ei | Die Informationen sollten in der Syntax und Terminologie des jeweiligen Fachgebiets des Benutzers dargestellt werden. |
| Ei | Attribute zur Verschlüsselung von Informationen sollten einheitlich nach üblichen Konventionen verwendet werden.      |
| Ei | Das System sollte den Benutzer informieren, wenn Konventionen gebrochen werden.                                       |

## C.4 Parallelprozesse

### C.4.1 Richtlinien zur Beherrschung von Kriechen und Relaxation

**Erläuterung** Kriechen und Relaxation sind auf das (teilweise) Plastifizieren bei langanhaltender Belastung nahe der Fließgrenze und erhöhte Temperaturen zurückzuführen. Unter Kriechen wird hierbei eine Zunahme der plastischen Verformung unter Last verstanden. Relaxation beschreibt die Minderung einer zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Verformung benötigten Kraft. Bei der Gestaltung müssen diese Effekte insofern berücksichtigt werden als dass die Veränderung in einem zulässigen Bereich bleibt und damit keine Auswirkung auf die Funktionalität hat (Robustheit gegenüber Kriechen und Relaxation). Konstruktive Maßnahmen bestehen im Vorsehen einer hohen elastischen Dehnungsreserve, dem Vermeiden von Masseanhäufungen oder einem gelenkten Kriechen.<sup>40</sup>

**Potential** Auswirkung verringern (*A*), Einfluss verringern (*E*), Unsicherheit verringern (*S*)

**Beispiel** Tabelle C.9 zwei Varianten eines Flanschdeckels. In der ungünstigen Variante links kriecht Material durch die wärmeinduzierten Eigenspannungen in die Hinterdrehung an der Stelle **y** und verhindert so die zerstörungsfreie Demontage des Flanschdeckels. Durch die verbesserte Gestaltung rechts hat Kriechen keine Auswirkung mehr die Demontage des Flanschdeckels.<sup>41</sup>

### C.4.2 Richtlinien zur Beherrschung von Korrosion

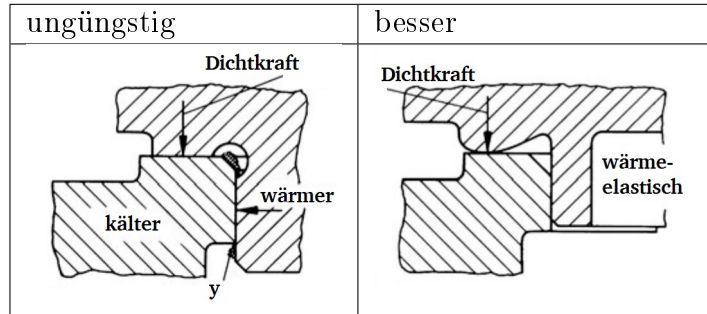
**Erläuterung** Unter Korrosion wird nach DIN EN ISO 8044 „...eine Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann“ verstanden. Korrosion ist nicht nur an den

---

<sup>40</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 598-605

<sup>41</sup>Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 605.

Tabelle C.9: Ungünstige und verbesserte Gestaltung eines Flanschdeckels. Quelle: nach FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 605



eigentlichen Produkteinsatzprozess gekoppelt. Die kumulierte Dauer der Exposition gegenüber eines korrosiven Mediums muss u.U. die gesamte Nutzungsphase berücksichtigen (bspw. Aufbewahrung). Korrosion lässt sich häufig nicht verhindern, da die entsprechenden unempfindlichen Werkstoffe unwirtschaftlich oder durch ihre sonstigen Eigenschaften ungeeignet sind. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 606 unterscheiden in Anlehnung an DIN 50900-1

- Korrosion freier Oberflächen,
- berührungsabhängige Korrosion,
- beanspruchungsabhängige Korrosion und
- selektive Korrosion im Werkstoff.

**Potential** Auswirkung von Unsicherheit verringern (*A*), Einfluss verringern (*E*), Unsicherheit verringern (*S*)

**Beispiel** Abbildung C.14 zeigt zwei Lösungsvarianten eines Behälters für Flüssigkeiten mit unterem Auslauf. Auf der linken Seite ist der Auslauf derart angeordnet, dass eine Flüssigkeitssammelstelle entsteht. Der Behälter kann dadurch niemals vollständig entleert werden (solange er senkrecht auf dem Boden steht). In der Folge korrodiert der Behälter deutlich stärker als in der Lösungsvariante rechts. Dort bildet sich keine Flüssigkeitssammelstelle aus.

**Maßnahmen zur Beherrschung von Korrosion** Die Maßnahmen entstammen Vgl. FELDHUSEN ET AL. (2013), S. 605-620

<sup>42</sup>Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an FELDHUSEN ET AL. (2013), S.609.



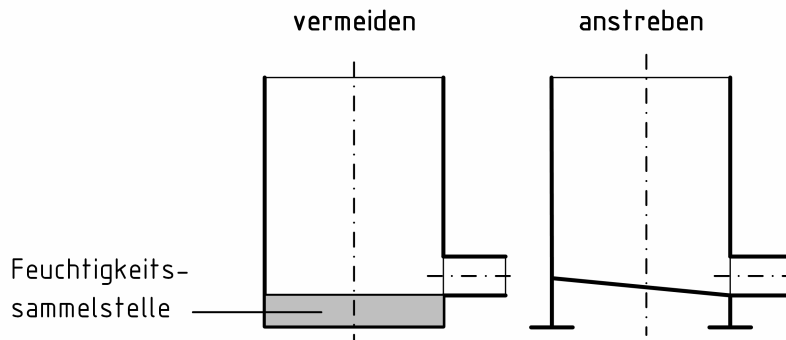


Abbildung C.14: Vergleich zweier Behälter in Bezug auf Korrosion. Die Lösungsvariante links verfügt über eine ausgeprägte Flüssigkeitssammelstelle, die die Korrosion des Behälters begünstigt. Die rechte Lösungsvariante vermeidet eine solche Ansammlung von Flüssigkeit. Korrosion wird dadurch verringert. <sup>42</sup>

**Flächenkorrosion** Es besteht ein gleichmäßiger Materialabtrag an der Oberfläche in Folge von Kontakt mit Feuchtigkeit unter Anwesenheit von Sauerstoff. Die Feuchtigkeit wirkt dabei als schwacher Elektrolyt. Flächenkorrosion wird durch aggressive Umgebungsmedien, hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder Temperaturunterschiede verstärkt.

Störgröße verringern:

- hohe Strömungsgeschwindigkeiten  $> 2m/s$  vermeiden
- Zonen hoher und unterschiedlicher Wärmebelastung bei beheizten Flächen vermeiden

Einfluss der Störgröße verringern:

- kleine und glatte Oberflächen anstreben, Maximierung des Verhältnisses von Inhalt zu Oberfläche, Widerstandsmoment zu Umfang
- Feuchtigkeitssammelstellen vermeiden
- Stellen mit Taupunktunterschreitung vermeiden
- Korrosionsschutzüberzug, auch in Verbindung mit kathodischem Schutz, anbringen

Auswirkung der Störgröße verringern:

- ausreichend lange und gleiche Lebensdauer mit entsprechender Waddickenwahl (Waddickenzuschlag) und Werkstoffeinsatz

**Muldenkorrosion, Lochkorrosion** Muldenkorrosion und Lochkorrosion bedeutet lokal unterschiedlich starken Abtrag, wobei die Lochkorrosion sich auf einen kleineren Bereich bezieht. Ursache der unregelmäßigen Korrosion sind lokal unterschiedliche Bedingungen in der Umgebung und im Bauteil selbst.

Störgröße verringern:

- unterschiedliche Bedingungen beseitigen

Einfluss der Störgröße verringern:

- Inhomogenitäten im Werkstoff/Bauteil Bedingungen beseitigen

**Spaltkorrosion** Spaltkorrosion entsteht durch eine saure Anreicherung des Elektrolyten in einem Spalt. Die Gefahr dabei ist, dass der Abtrag erst spät erkannt wird, da er an schwer einsehbaren Stellen passiert.

Einfluss der Störgröße verringern:

- glatte, spaltlose Oberflächen schaffen, auch an Übergangsstellen
- Schweißnähte ohne bleibenden Wurzelspalt vorsehen, Stumpfnähte oder durchgeschweißte Kehlnähte verwenden
- Spalte abdichten
- Spalte so groß machen, dass infolge Durchströmung oder Austausch kein Sauerstoffmangel entsteht, d. h. Belüftung ermöglichen

**Kontaktkorrosion** Berühren sich zwei Körper aus Metall unter Anwesenheit eines Elektrolyten kommt es zur Kontaktkorrosion. Dabei korrodiert das unedlere Metall nach dem Prinzip der galvanischen Korrosion.

Störgröße verringern:

- Metallkombinationen mit geringem Potenzialunterschied verwenden
- Elektrolyt überhaupt vermeiden

Einfluss der Störgröße verringern:

- Einwirkung des Elektrolyten auf Kontaktstelle durch örtliches Isolieren verhindern

Auswirkung der Störgröße verringern:

- notfalls gesteuerte Korrosion durch gezielten Abtrag an elektrochemisch unedlerem Fressmaterial vorsehen

---

**Ablagerungskorrosion** Die Ablagerungskorrosion ähnelt der Kontaktkorrosion. Der Unterschied besteht im zweiten Festkörper, der sich aus Ablagerungen von Fremdkörpern, Korrosionsprodukten, Rückständen aus dem geförderten Medium etc. zusammensetzt.

Störgröße verringern:

- Ablagerungsprodukte vermeiden, herausfiltern oder gezielt sammeln
- Totwasserzonen konstruktiv vermeiden, gleichmäßige Strömung, nicht zu geringe Geschwindigkeiten und selbsttätige Entleerung anstreben
- Anlageteile spülen oder reinigen

**Korrosion an Phasengrenzen** Die Korrosionsgefahr geht hier von ständigen Wechseln des Mediums zwischen flüssiger und gasförmiger Phase aus. Die Korrosion beschränkt sich auf den Umschlagbereich, je kleiner die Zone und je aggressiver das Medium, desto stärker die Korrosion. Begleitend können Verkrustungen entstehen, die die Korrosion verstärken.

Störgröße verringern:

- allmähliche Wärmezufuhr- bzw. -abfuhr längs einer Heiz- oder Kühlstrecke vorsehen
- Turbulenz vermindern, d. h. Wärmeübergangszahlen am Einlauf des umschlagenden Mediums vermindern
- Übergangsbereiche zwischen flüssiger und gasförmiger Phase mit entsprechender Gestaltung vermeiden oder in weniger gefährdete Zonen verlegen
- Flüssigkeitspiegel schwanken lassen

Einfluss der Störgröße verringern:

- korrosionsbeständigen Schutzmantel an kritischen Stellen vorsehen

**Schwingungskorrosion** Schwingende Beanspruchung bei gleichzeitigem Korrosionsangriff senkt die Festigkeit von Bauteilen und damit die Lebensdauer stark. Die Korrosion ist häufig schwer zu erkennen, das Bauteil versagt mit einem verformungslosen Bruch.

Störgröße verringern:

- mechanische oder thermische Wechselbeanspruchung klein halten Spannungserhöhung infolge Kerben vermeiden
- Druckvorspannung als Eigenspannung durch Kugelstrahlen, Prägepolieren, Nitrieren usw. erhöht Lebensdauer
- korrosives Medium (Elektrolyt) fernhalten

Einfluss der Störgröße verringern:

- Oberflächenschutzüberzüge vorsehen

**Spannungsrissskorrosion** Spezielle Werkstoffe reagieren besonders empfindlich auf ruhende Zugbelastung in Kombination mit speziellen, die Risse auslösende Substanzen. Sie bilden dann sehr feine, sich schnell verlängernde trans- oder interkristalline Risse aus.

Störgröße verringern:

- Riss auslösende Substanzen vermeiden oder durch Erniedrigung der Konzentration und der Temperatur mildern
- Spannungsrissempfindliche Werkstoffe vermeiden
- Zugspannung an der angegriffenen Oberfläche vermeiden
- Druckspannung in Oberfläche einbringen
- Eigenzugspannungen durch Spannungsarmglühen abbauen

Einfluss der Störgröße verringern:

- kathodisch wirkende Überzüge aufbringen

**Dehnungsinduzierte Korrosion** Die Deckschicht wird durch wiederholte, zu große Dehnung und Stauchung beschädigt. Es kommt zu lokaler Korrosion.

Störgröße verringern:

- Dehnungs- bzw. Stauchungsbeträge vermindern

**Reibkorrosion** Reibkorrosion entsteht schon bei kleinen Relativbewegungen an Kontaktflächen. Dabei bilden sich die Korrosion verstärkende harte Oxidationsprodukte.

Störgröße verringern:

- Scheuerbewegung beseitigen
- Rohrschwingungen verkleinern
- Spalte zwischen Leitblechen und Rohren vergrößern, sodass keine Berührung stattfindet

Einfluss der Störgröße verringern:

- Werkstoffe mit besserer Haftung der Schutzschicht verwenden

Auswirkung der Störgröße verringern:

- Wanddicke (der Rohre) vergrößern

---

**selektive Korrosion** Selektive Korrosion findet im Werkstoffgefüge statt. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Korrosionsbeständigkeit der Bestandteile. Die Folge kann beispielsweise interkristalline Korrosion oder das Herauslösen von Komponenten, wie der Entzinkung bei Messing, sein.

Störgröße verringern:

- geeignete Werkstoffwahl und deren Verarbeitung

### C.4.3 Richtlinien zur Beherrschung von Verschleiß

**Erläuterung** Unter Verschleiß wird „unerwünschte[s] Lösen von Teilchen infolge mechanischer Ursachen“ verstanden.<sup>43</sup> Im Modell technischer Systeme kann die Rückwirkung aus dem Prozess als Wirkgröße für Verschleißprozesse identifiziert werden, wobei unter Umständen Störgrößen den Prozess zusätzlich beschleunigen. Da Verschleiß im Normalfall unerwünscht ist, streben FELDHOUSEN ET AL. (2014), S. 377 danach die Ursachen für den Verschleiß zu beheben (sogenannte Primärmaßnahmen). Hierfür bieten sich tribologische Maßnahmen an, die ungünstige Festkörper- beziehungsweise Mischreibung zugunsten von Flüssigkeitsreibung vermeiden. Zusätzlich sollten Partikel aus dem Fluidstrom bspw. mit Hilfe eines magnetischen Abscheiders herausgefiltert werden. Gelingt dies nicht, kommen sog. Sekundärmaßnahmen wie bspw. das Vorsehen von austauschbaren Verschleißteilen zum Einsatz.<sup>44</sup> Um Verschleißraten messen zu können, müssen Verschleißteile entsprechend prüfgerecht gestaltet werden<sup>45</sup>.

**Potential** Auswirkung der Unsicherheit verringern (*A*), Adaption durch Kompensation, Nachstellen, oder Austauschen (*Z*)

**Beispiel** Beim Drehen findet an der Schneide des Drehmeißels durch die lokal hohen Beanspruchungen und zusätzliche Temperaturbelastung Verschleiß statt. Durch Einsatz von Kühl- und Schmierstoffen kann dieser abgemindert werden. Eine Möglichkeit zur Beherrschung von Verschleiß beim Drehen besteht im Nachstellen des Werkzeuges, oder aber in zusätzlichen Prozessen zur Wiederherstellung der Schneidengeometrie (schärfen). Zumindest für das Nachstellen muss jedoch der Verschleißzustand sehr genau ermittelt werden.

Ein anschauliches Beispiel für den Einsatz von austauschbaren Verschleißteilen zeigt Abbildung C.15. Der dargestellte Eckdrehmeißel ist mit einer Wendeschneidplatte ausgerüstet. Diese besteht aus einem meist keramischen Schneidwerkstoff. Tritt Verschleiß auf, kann das Teil schnell und einfach ausgetauscht werden. Der Drehmeißel selber wird weiter verwendet.

---

<sup>43</sup>Vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2014), S. 377.

<sup>44</sup>Vgl. FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 621-622.

<sup>45</sup>Vgl. CONRAD (2013), S. 324.

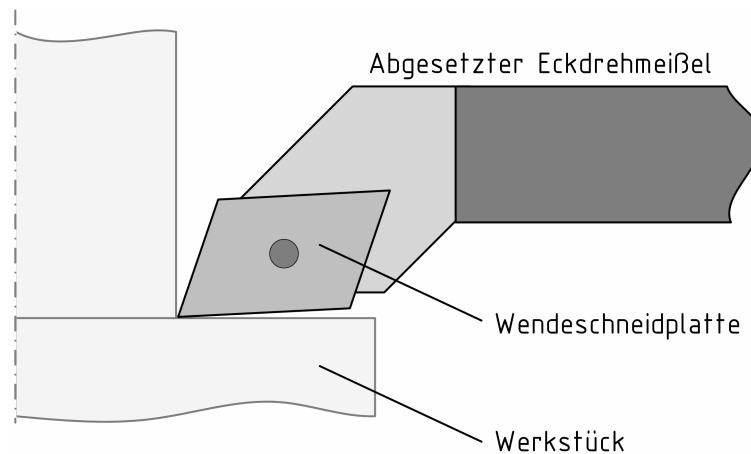


Abbildung C.15: Wendeschneidplatte am Drehwerkzeug.

Tabelle C.10: Hinweise zur *verschleißgerechten Gestaltung*

Quelle: FELDHOUSEN ET AL. (2013), S. 621-622; FELDHOUSEN ET AL. (2014), S. 337-338; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 194

| Ziel | Gestaltungshinweis   |
|------|--|
| A    | Alterungs-/Abnutzungserscheinungen durch Kompensation beseitigen/herauszögern, Verschleißteile vorsehen                                  |
| S    | Ursache für Verschleißmechanismus vermeiden (Primärmaßnahmen)  |
| E    | Flüssigkeitsreibung (elastohydrodynamischer Effekt, alternativ hydrostatisches oder magnetisches System) vor Festkörperreibung vorziehen |
| A    | Sind Primärmaßnahmen nicht möglich, werkstoffseitige und schmierungstechnische Sekundärmaßnahmen vorsehen                                |
| S    | Verschleißpartikel aus Fluidstrom filtern  |
| A    | Verschleißzonen leicht auswechselbar gestalten   |
| E    | Verschleißzonen aus verschleißfestem Werkstoff kostengünstig herstellbar gestalten   |
| K    | Verschleißzustand durch Verschleißmarken kennzeichnen  |
| A    | ertragbare, eindeutige und örtlich gleichmäßige Beanspruchung vorsehen   |
| E    | eine einen Schmierfilm aufbauende oder unterstützende Bewegung der Kontaktflächen vorsehen   |
| A    | eine auch unter Temperatur- oder sonstigen Einflüssen definiert erhalten bleibende Geometrie der Bauteile vorsehen                       |
| A    | eine zweckmäßige Werkstoffwahl, die aufgrund der Paarung adhäsiven oder abrasiven Verschleiß mildert, vorsehen                           |

---

|   |   |
|---|---|
| E | bei abrasivem Verschleiß Härte des weicheren Partners erhöhen         |
| S | bei Ermüdungsverschleiß örtliche Beanspruchung mindern oder verteilen |

**Werkstoffseitige Maßnahmen gegen Metallabtrag** Durch eine geeignete Wahl des Werkstoffes kann die Beständigkeit gegen Metallabtrag erhöht werden. Dadurch wird die Lebensdauer des Produkts erhöht.<sup>46</sup>

Einfluss der Störgröße reduzieren:

- Rostbeständigkeit gegen aggressive Medien im chemischen Apparatebau
- Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion bei Legierungen
- Witterungsbeständigkeit bei Außenverkleidungen
- Meerwasserbeständigkeit im Schiffbau
- Kunststoffbeschichtung bei Blechen und Rohren
- keine Pitting- und Gallingneigung bei Zahnradwerkstoffen
- gute Hitze- und Zunderbeständigkeit bei Stählen für den Ofen- und Werkzeugbau für Warmarbeit und für Ventile
- Beständigkeit gegen Flüssigkeiten und Gase bei Dichtungen

Auswirkung der Störgröße verringern:

- gute Einlauf- und Notfallverhalten und geringer Reibverschleiß bei Lagerwerkstoffen und Werkstoffen für Zylinderlaufbüchsen

---

<sup>46</sup>Vgl. KURZ ET AL. (2009), S. 60.

## C.5 Prozessvarianten

### C.5.1 Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in Prozessvarianten

#### Produktflexibilität und -modularisierung

**Erläuterung** Bei der flexiblen Produktgestaltung spielt die Anpassungsfähigkeit eines technischen Systems an sich ändernde Anforderungen eine zentrale Rolle. Durch die Adaptionfähigkeit können Systeme entsprechend zukunftsrobust und robust gegenüber schwankenden Bedürfnissen der Kunden ausgeführt werden.

Flexibilität kann durch Modularisierung des technischen Produktes erreicht werden.<sup>47</sup>

Siehe BIRKHOFFER und KLOBERDANZ (2007), S. 249 definieren diese wie folgt:

Mit der Modularisierung des Produktspektrums werden die Abgrenzung von variantenarmen und variantenreichen Baugruppen sowie die Standardisierung der dabei auftretenden Schnittstellen angestrebt. Damit soll eine rasche kundenindividuelle Produktkonfiguration bei gleichzeitig hohem Verbrauch von Standardkomponenten erzielt werden.

Der erhöhte Verbrauch von Standardkomponenten wirkt sich hierbei positiv auf die Unsicherheitsbeherrschung aus, da unternehmensintern durch die verringerte Komplexität die Wahrscheinlichkeit von Fehlern sinkt (es gibt weniger Prozesse, weniger Information, weniger Vernetzung). Die sinnvolle Abgrenzung von Baugruppen hingegen bietet die oben beschriebene Möglichkeit zur Anpassung des technischen Systems mit minimalem Ressourceneinsatz. Zur Ableitung einer modularen Produktarchitektur stehen viele verschiedene Methoden und Hilfsmittel zur Verfügung. Grundlegende Ansätze stellen *METUS* nach GÖPFERT (1998), *Modular Function Deployment* nach ERIXON (1996), *Integration Analysis Methodology* nach PIMMLER und EPPINGER (1994) und STONE (12.1997) mit der *Theory of Modular Design* dar, die in der Fachliteratur häufig aufgegriffen und weiterentwickelt werden, vgl. Tabelle C.11. Für die Entwicklung zukunftsrobuster Produktarchitekturen schlagen bspw. SCHUH ET AL. (2009), oder GAUSEMEIER ET AL. (1995) die Anwendung der *Szenariotechnik* vor.

**Wirkungsweise im RD** Anpassung ( $Z$ ), Fehlermöglichkeiten reduzieren ( $F$ )

**Beispiel** Abbildung C.16 zeigt einen modular aufgebauten Staubsauger. Durch den hohen Modularisierungsgrad sind viele verschiedene Konfigurationen möglich. Hierdurch können sehr viele Nutzungsprozessvarianten umgesetzt werden, wobei der Anteil der

---

<sup>47</sup>Vgl. GÖPFERT (1998), S. 125; Vgl. KEESE ET AL. (2007), S. 478-493; Vgl. PALANI RAJAN ET AL. (2003), S. 8-9



Tabelle C.11: Auswertung von Dissertationen in Zusammenhang mit Modularisierung in Bezug auf verwendete Methoden zur Modularisierung zur Ermittlung der Grundlagenwerke bzw. Hauptmethoden.

| Autor   | Jahr           | Name der Methodik   | Aufgegriffene Methoden und/oder eigene Methodenentwicklung   | Kopenhagen (2004) | Baumgart (2005) | Dellanoi (2006) | Renner (2006) | Boos (2008) | Rapp (2010) | Arnscht (2011) | Blees (2011) | Krause (2012) | Kipp (2013) | Summe |
|---|----------------|---|--|-------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|----------------|--------------|---------------|-------------|-------|
| Baumgart  | 2004           | Modularisierung von Produkten im Anlagenbau   | DSM-ähnliche Verwendung einer Schnittstellen und Verträglichkeitsmatrix, Entwicklung einer Merkmalsausprägungsmatrix (in Anlehnung an Rapp)  |                   |                 |                 | x             |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Blackenfeld   | 2000/2001      | Modularisation by relational Matrices   | DSM, MIM (ab 2001 eigenes Bewertungsschema) und Entwicklung einer Kombination von DSM und MIM  | x                 |                 |                 |               |             |             |                | x            |               |             | 2     |
| Blees/Jonas/ Krause und Blees                         | 2010/2011      | Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien   | DSM, MIM, (Blees (2011) verwendet 3 Heuristiken nach Stone) und Entwicklung der Module Process Chart (MCP) und Module Interface Graph (MIG)  |                   |                 |                 |               |             |             |                | x            | x             |             | 2     |
| Erixon  | 1996/1998      | Modular Function Deployment (MFD)   | Entwicklung der Module Indication Matrix (MIM)   | x                 | x               | x               |               | x           | x           | x              | x            | x             | x           | 9     |
| Gausemeier/Riepe                                      | 2000           | Entwicklung modularer Produktarchitekturen  | Keine relevante methodische Hilfestellung zur Ableitung modularer Produkte; zur Gliederung des Produktes in Module wird auf die Funktionsstruktur zurückgegriffen  | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Göpfert   | 1998           | Modulare Produktentwicklung - Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS)                 | Entwicklung der Gestaltungsmethodik METUS auf Basis der Funktionsstruktur  | x                 | x               | x               |               | x           |             | x              | x            | x             | x           | 8     |
| Gu/Sosale   | 1999           | Product Modularisation for Life Cycle Engineering   | DSM-ähnliches Vorgehen   | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Kamrani/Salhi   | 2001           | Design for Modularity   | Entwicklung der Methode Design for Assembly (DFA)  |                   |                 |                 | x             |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Koeppen   | 2008           | Modularisierung anhand von Komponentenkopplungen  | DSM, MIM und zusätzliche Gewichtung der Modultreiber über Anteil am Gesamtwert   |                   |                 |                 |               |             |             |                | x            |               |             | 1     |
| Kopenhagen  | 2004           | Modular Engineering   | Kombination aus DSM, MIM und Quality Function Deployment (QFD)   |                   |                 |                 | x             |             |             |                | x            |               |             | 2     |
| Kusiak/ Szczerbicki und Kusiak/Huang und Huang/Kusiak | 1993/1996/1998 | Development of Modular Products   | Entwicklung von Kopplungsgraphen und einer Modularitätsmatrix (bestehend aus Kopplungs- und Verträglichkeitsmatrix), DSM-ähnliches Vorgehen (Verweis allerdings auf Steward (1965) und nicht auf Pimpler/Eppinger) | x                 |                 |                 |               |             |             |                | x            |               |             | 2     |
| Lange   | 1998           | CONCAD Bridging: Managing the Integration of Technical Solutions in a Modularized Product Concept | DSM, MIM und Entwicklung einer Kombination aus DSM und MIM   | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Lanner/Malmqvist                                      | 1996           | An Approach Towards Considering Technical and Economic Aspects in Product Architecture Design     | DSM, MIM und Entwicklung einer Kombination aus DSM und MIM (Lanner-Matrix)   | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Marks/Eubanks/Ishi                                    | 1993           | Life-Cycle Clumping of Product Designs for Ownership and Retirement                               | Keine relevante methodische Hilfestellung zur Ableitung modularer Produkte   | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Lindemann/Maurer/ Braun                               | 2009           | Structural Complexity Management  | DSM und Entwicklung der Multiple Domain Matrix (MDM)   |                   |                 |                 |               |             |             |                | x            |               | x           | 2     |
| Nilsson/Erixon  | 1998           | Erweiterung der Modular Function Deployment   | MIM, Erweiterung der Modular Function Deployment nach Erixon   | x                 |                 |                 |               |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Newcomb/Bras/ Rosen                                   | 1996           | Modularisierung auf Basis von After Sales Aspekten  | DSM und Entwicklung der beiden Kennzahlen Correspondence Ratio und Cluster Independence  | x                 |                 |                 |               |             |             |                | x            |               |             | 2     |
| Persson   | 2004           | Modularization of complex products (Fallstudie der Volvo Car Corporation)                         | K. A. (nicht auffindbar)   |                   |                 |                 |               |             |             | x              |              |               |             | 1     |
| Piller/Waringer                                       | 1999           | Gestaltung von modularen Produkten in der Automobilindustrie                                      | Funktionsstrukturanalyse und Unterscheidung zwischen Muss- und Kann-Modulen nach Ungeheuer   |                   |                 |                 | x             |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Pimpler/Eppinger                                      | 1994           | Integration Analysis Methodology  | Entwicklung der Design Structure Matrix (DSM)  | x                 | x               |                 | x             |             |             | x              | x            | x             |             | 6     |
| Sauer   | 2001           | Standardisierung und Modularisierung  | Keine relevante methodische Hilfestellung zur Ableitung modularer Produkte   |                   |                 |                 | x             |             |             |                |              |               |             | 1     |
| Sekolec   | 2005           | Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements                                     | Keine relevante methodische Hilfestellung zur Ableitung modularer Produkte   |                   |                 |                 |               |             |             | x              |              |               |             | 1     |



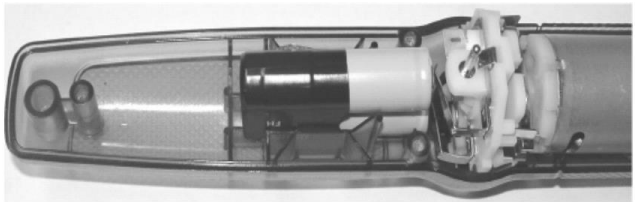

Abbildung C.16: Produktmodularisierung am Beispiel eines Staubsaugers.<sup>49</sup>

Varianten der einzelnen Module überschaubar bleibt. Die externe Vielfalt kann so bei geringer interner Vielfalt zur Verfügung gestellt werden.<sup>48</sup>

### Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in Prozessvarianten



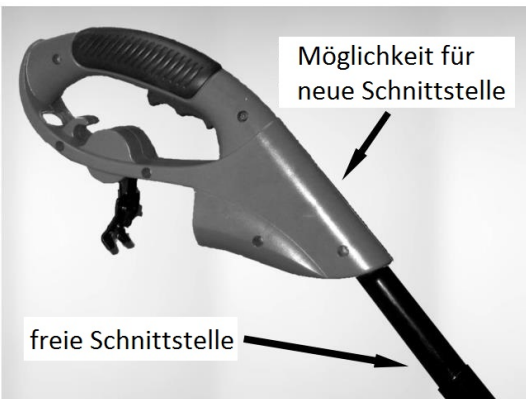


Tabelle C.12: Gestaltungshinweise zur *Verbesserung der Produktflexibilität*

Quelle: KEESE ET AL. (2007), S. 478-493; PALANI RAJAN ET AL. (2003), S. 8-9

| Ziel | Gestaltungshinweis                           | Beispiel  |
|------|--|---|
| Z    | Anzahl oder Größe von Pufferzonen erhöhen    |                               |
| Z    | Technologie, die nicht bald veraltet, nutzen | Die Batterie, die im Schraubenzieher im Beispiel oberhalb verwendet wird, veraltet voraussichtlich nicht schnell. |
| Z    | Funktionsumfang erhöhen                      |  drei verschiedene Minen      |

<sup>48</sup>Vgl. VAN WIE (2002), S. 104.

<sup>49</sup>Quelle: VAN WIE (2002), S. 104.

|    |   |   |   |
|----|---|---|---|
| U  | separate Module für unabhängige Funktionen nutzen                               | Armstütze, Rückenlehne und Basisteil im Schreibtischstuhl rechts sind als unabhängige Module ausgeführt |    |
| Ei | möglichst viele duplizierte Teile verwenden ohne die Gesamtteilezahl zu erhöhen |                      |   |
| Z  | unbenutzte Schnittstellen und Möglichkeiten für neue Schnittstellen vorsehen    |                     |   |
| U  | Verschachteln von Teilen und Modulen vermeiden                                  |                      |  |

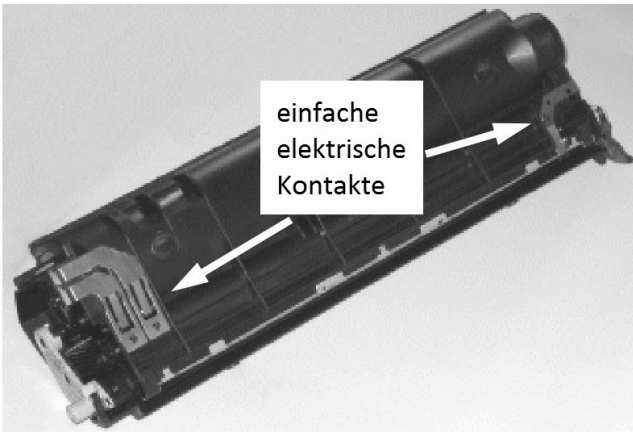
|      |  | vermeiden  | anstreben |
|------|--|--|-----------|
| F    | Geometrie der Modulschnittstellen vereinfachen   |  |           |
| Ei   | Verbindung zwischen Modulen standardisieren oder Anzahl der Unterschiedlichen minimieren               |  |           |
| U    | freien Platz in übertragbaren Modulen vorsehen   |  |           |
| U    | Energie-, Informations- und Stoffflüsse so legen, dass sie, falls benötigt, jedes Modul umgehen können |  |           |
| Ei   | standartisierte Teile und Schnittstellen nutzen  |  |           |
| U    | Realisierung der Funktionen auf einzelne Module eingrenzen   |  |           |
| U, F | Realisierung der Funktionen auf möglichst wenig Komponenten eingrenzen                                 |  |           |
| U    | Teile, die sich vorraussichtlich nicht bald ändern werden, in separaten Modulen sammeln                |  |           |


Tabelle C.13: Gestaltungshinweise zur *Produktmodularisierung*

Quelle: GÖPFERT (1998), S. 125

| Ziel | Gestaltungshinweis                                      |
|------|---|
| U    | Gestalte ein Produkt aus möglichst unabhängigen Modulen |
| U    | Prinzip der Aufgabentrennung anwenden                   |
| U    | physisch unabhängige Module entwickeln                  |
| V    | eindeutige Schnittstellen spezifizieren                 |
| Ei   | Module wiederverwenden                                  |

Tabelle C.14: Gestaltungshinweise zur *Produktarchitektur*

Quelle: FRENCH (1994), S. 232; KRAUSE und BÜRGER (2000), S. 196; VAN WIE (2002), S. 104-111

| Ziel | Gestaltungshinweis  | Beispiel   |
|------|---|--|
| Z    | mehrere an die Nutzung angepasste Gerätekonfigurationen entwickeln, Produktflexibilität für unbekannte Änderungen erhöhen   |  |
| U    | kritische Bewegungen in weniger kritischen legen  |  |
| Ei   | erprobte Elemente und Systeme verwenden   |  |
| S, F | Schmierung, besonders beim Anwender vermeiden   |  |
| F    | Komplexität der Bewegung des Gerätes reduzieren: Anzahl und Änderungen der Bewegungs(-richtungen) reduzieren  |  |
| A    | negativen Effekt von Überlast reduzieren, z. B. durch Nutzen von thermischen Effekten, Schmierung, Ändern des Werkstoffes, Oberflächenbehandlung oder Einsatzteilen |  |
| F, S | Automatisierung in Nutzungsphase erhöhen durch Beschleunigen von Nutzungsprozess, Ersetzen von menschlicher Energie mit alternativer Energiequelle                  |  |

# D Evaluation

## D.1 Detaillierte Dokumentation der SmArtSys

### D.1.1 Gestaltungszone Höhenverstellung

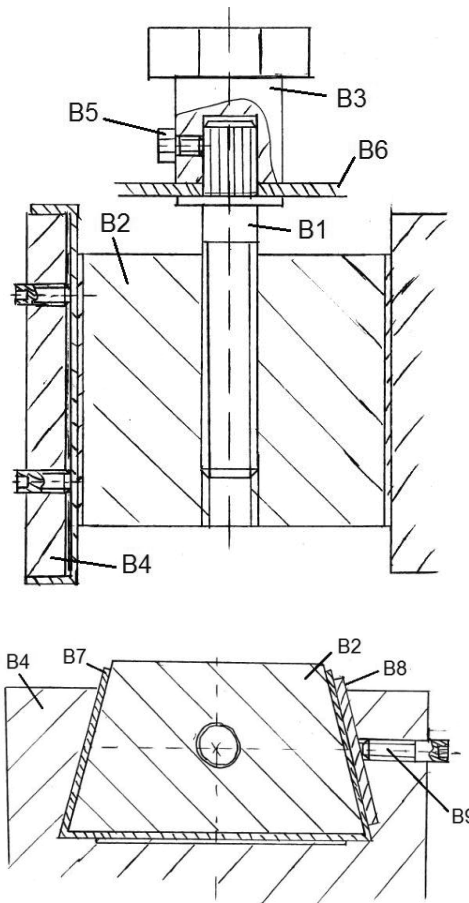
Die folgenden Seiten sind THIELE (2017) entnommen.

## Dokumentation der Anwendung des DfR

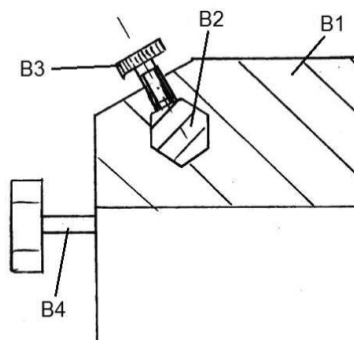
### 1. Höhenverstellung

#### a. DSM vor der Synthese

- i. Höhenverstellung mit Bewegungsschraube und Schwalbenschwanzführung



- ii. Haltestange mit Ritzel-Zahnstange-Getriebe



| Prozesselement   | Wirkungsweise | Konstruktionshinweis  | Höhenverstellung mit Bewegungsschraube und Schwalbenschwanzführung  | Haltestange mit Ritzel-Zahnstange-Getriebe     |
|--|---------------|---|---|--|
| Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung  | F, St         | Prinzip der Standardisierung  | Bauteil 1 (Spindel mit Rändelung)                                   | B1 (Führungsschlitten)                         |
|  |               |   | B2 (Führungsschlitten)  | B2 (Brennerhaltestange)                        |
|  |               |   | B3 (Griff)  | B3 (Klemmschraube)                             |
|  |               |   | B4 (Führungsschiene)  | B4 (Stellrad für das Ritzel)                   |
|  |               |   | B5 (Klemmschraube)  |  |
|  |               |   | B6 (Sperrlasche)  |  |
|  |               |   | B7 (Schlittenblech)   |  |
|  |               |   | B8 (Ausgleichsblech)  |  |
|  |               |   | B9 (Stellschraube)  |  |
| Bauweisen zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung   | F             | Prinzip der Funktionenintegration, Integralbauweise   | B1  | B1   |
|  |               |   | B2  | B2   |
|  |               |   | B3  | B3   |
|  |               |   | B4  | B4   |
|  |               |   | B5  |  |
|  |               |   | B6  |  |
|  |               |   | B7  |  |
|  |               |   | B8  |  |
|  |               |   | B9  |  |
|  | U             | Prinzip der Funktionentrennung, Differentialbauweise  |   |  |
| Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Fertigung | F             | Einfache Herstellung anstreben  | B4, B2, die Schwalbenschwanzführung muss aufwendig gefertigt werden | B1 ist sehr aufwendig herzustellen (Pressguss) |
|  | F             | Stufenarmen Fertigungsprozess anstreben   |   | B1: Pressguss + Räumen + Bohren + Fräsen       |
|  | F             | Wenig Einzelteile/Varianten anstreben   |   |  |
|  | St            | Normteile verwenden   |   |  |
|  | F             | Einfach herstellbare und messbare Teilgestalt und Flächenformen bevorzugen  | Schwalbenschwanzführung   |  |
|  | Q             | Ansatz und Auslauffläche sollten senkrecht zur Bohrachse stehen   |   |  |
|  | V, F          | Unnötig enge Toleranzen und Doppelpassungen vermeiden   |   |  |
|  | S             | Spielfreie Gelenke, Führungen, Gewinde und Steckverbindungen lassen sich mit Justierelementen kostengünstiger realisieren als ohne diese Elemente |   |  |
| Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage    | F, A, S       | Prinzip der Symmetrie   |   |  |
|  | A, U          | Prinzip der Fehlerjustierung  |   |  |

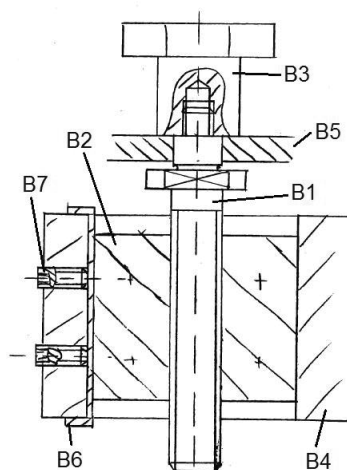


|  |    |   |  |  |  |   |
|--|----|---|--|--|--|---|
| Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage | F  | Wenn Asymmetrie notwendig, dann deutlich gestalten oder Farbcodierung verwenden   |  | B1   |  | B1  |
|  |    |   |  | B2   |  | B2  |
|  |    |   |  | B3   |  | B3  |
|  |    |   |  | B4   |  | B4  |
|  |    |   |  | B5   |  |   |
|  |    |   |  | B6   |  |   |
|  |    |   |  | B7   |  |   |
|  |    |   |  | B8   |  |   |
|  |    |   |  | B9   |  |   |
|  | F  | Asymmetrische Erkennungsmerkmale an die Außenkante legen  |  | B1   |  | B1  |
|  |    |   |  | B2   |  | B2  |
|  |    |   |  | B3   |  | B3  |
|  |    |   |  | B4   |  | B4  |
|  |    |   |  | B5   |  |   |
|  |    |   |  | B6   |  |   |
|  |    |   |  | B7   |  |   |
|  |    |   |  | B8   |  |   |
|  |    |   |  | B9   |  |   |
|  | V  | Alle Flächen so gestalten, dass sich eindeutige Lagen ergeben und alle sechs Freiheitsgrade z. B. beim Spannen gebunden werden können |  |  |  |   |
|  | A  | Stützpunkte möglichst weit auseinander legen  |  |  |  |   |
|  | F  | Selbstpositionierung von Bauteilen anstreben, Positionierhilfen vorsehen  |  |  |  |   |
|  | F  | Endanschläge vorsehen   |  |  |  | B2 und B3 sind nicht gegen herausfallen gesichert |
|  | F  | Zahl der Montageoperationen gering halten   |  | Viele Einzelteile  |  |   |
|  | F  | Einfache Fügebewegungen vorsehen  |  |  |  |   |
|  | F  | Anzahl der Fügeseiten und Montageeinrichtungen reduzieren, Teil möglichst nicht neu positionieren                                     |  | B5, B3 und B1 müssen von verschiedenen Seiten zugeführt werden |  |   |
|  | V  | Möglichst viele der zu bindenden Freiheitsgrade sperren   |  |  |  | B2 und B3 sind nicht gegen herausfallen gesichert |
|  | V  | Lageveränderung gefügter (nicht verbundener) Bauelemente vermeiden  |  |  |  |   |
|  | St | Standardverbindungen einsetzen  |  |  |  |   |
|  | U  | Pro Koordinatenrichtung eine Justiereinheit   |  | B9 beeinflusst Toleranzen in 2 Achsrichtungen                  |  |   |

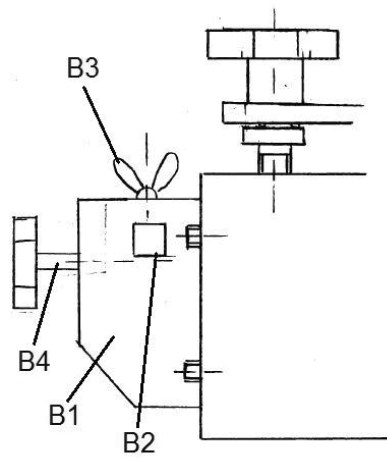
|   |       |  |  |  |  |
|---|-------|--|--|--|--|
| Grundregeln zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit | V     | Eindeutigkeit  |  | Schwalbenschwanzführung  | Uneindeutigkeit durch die sechskantige Gestalt der Brennerstange (Doppelpassung) |
|   | F, St | Einfachheit und Informationsaxiom  |  |  | Sechskantige Gestalt der Brennerstange   |
|   | U     | Unabhängigkeitsaxiom   |  | Hohe Montagevernetzung bezieht sich allerdings nur auf die Höhenverstellung und ist vertretbar |  |
| Prinzipien zur Funktionserfüllung unter Unsicherheit  | E     | Prinzip der Abschirmung von Störgrößen   |  |  |  |
|   | V, A  | Prinzip der Verwendung von Spiel   |  |  |  |
|   | A     | Prinzip der Elastizität  |  |  |  |
|   | U     | Prinzip der Redundanz  |  |  |  |
|   | E, A  | Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen  |  | Große, präzise Flächen an der Schwalbenschwanzführung  | Große, präzise Flächen   |
| Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen                 | A, S  | Ausdehnungsgerecht   |  |  |  |
|   | F, St | Ergonomiegerecht   |  |  | Rändelschraube an Flamme   |
|   | A     | Methode der Unterlastung durch Überdimensionierung, bzw. Belastungsredundanz   |  |  |  |
|   | S     | Wärmequelle beseitigen, reduzieren oder isolieren  |  |  |  |
|   | S     | Wärmequelle konstant halten, um sie zu handhaben   |  |  |  |
|   | E     | Bauteile vor unzulässigen Spannungen infolge von schwankender Temperaturen schützen, Kälteschrumpfspannungen vermeiden |  |  |  |
|   | A     | Spindelwachstum kompensieren   |  |  |  |

## b. DSM nach der Synthese

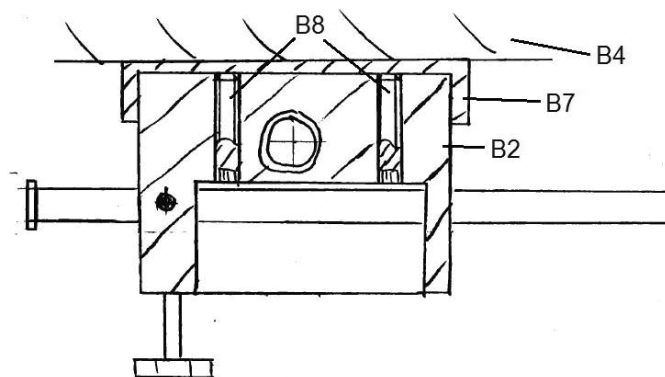
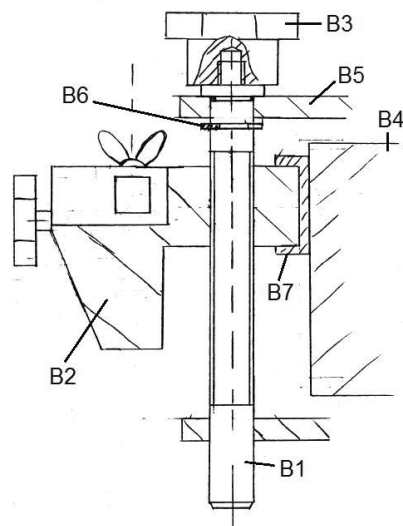
### i. Höhenverstellung mit Bewegungsschraube und T-Führung



ii. Haltestange mit Ritzel-Zahnstange-Getriebe



iii. Höhenverstellung mit offener Führung



| Prozesselement  | Wirkungs-<br>weise | Konstruktionshinweis  | Höhenverstellung mit<br>Schwalbenschwanzführung   | Haltestange mit Ritzel-<br>Zahnstange-Getriebe              | Höhenverstellung<br>mit offener Führung |
|---|--------------------|---|---|---|---|
| Prinzipien zur<br>Beherrschung<br>von Unsicherheit<br>in der Fertigung  | F, St              | Prinzip der<br>Standardisierung   | Bauteil 1 (Spindel)   | B1<br>(Führungsschlitten)                                   | Bauteil 1 (Spindel<br>mit Gewinde)      |
|   |                    |   | B2 (Führungsschlitten)  | B2 (Brenner-<br>haltestange)                                | B2 (Führungs-<br>schlitten)             |
|   |                    |   | B3 (Griff)  | B3 (Klemmschraube)  | B3 (Griff)                              |
|   |                    |   | B4 (Führungsschiene)  | B4 (Stellrad für das<br>Ritzel)                             | B4<br>(Führungsebene)                   |
|   |                    |   | B5 (Sperrlasche)  |   | B5<br>(Führungslaschen)                 |
|   |                    |   | B6 (Ausgleichsblech)  |   | B6 (Sicherungsring)                     |
|   |                    |   | B7 (Stellschraube)  |   | B7<br>(Ausgleichsblech)                 |
|   |                    |   |   |   | B8 (Stellschrauben)                     |
|   |                    |   |   |   |   |
| Bauweisen zur<br>Beherrschung<br>von Unsicherheit<br>in der Fertigung   | F                  | Prinzip der<br>Funktionenintegration,<br>Integralbauweise   | B1  | B1  | B1                                      |
|   |                    |   | B2  | B2  | B2                                      |
|   |                    |   | B3  | B3  | B3                                      |
|   |                    |   | B4  | B4  | B4                                      |
|   |                    |   | B5  |   | B5                                      |
|   |                    |   | B6  |   | B6                                      |
|   |                    |   | B7  |   | B7                                      |
|   |                    |   |   |   | B8                                      |
|   |                    |   |   |   |   |
|   | U                  | Prinzip der<br>Funktionentrennung,<br>Differentialbauweise  |   |   |   |
| Richtlinien zur<br>Beherrschung<br>von Unsicherheit<br>in der Fertigung | F                  | Einfache Herstellung<br>anstreben   | Geometrie der Führung<br>ist stark vereinfacht<br>worden und ist damit<br>leichter fertigbar                  | Herstellungs-<br>verfahren von B1 ist<br>noch nicht geklärt |   |
|   | F                  | Stufenarmen<br>Fertigungsprozess<br>anstreben   |   |   |   |
|   | F                  | Wenig<br>Einzelteile/Varianten<br>anstreben   | Gleich viele Einzelteile,<br>wie bei der Schwalben-<br>schwanzführung   |   |   |
|   | St                 | Normteile verwenden   |   |   |   |
|   | F                  | Einfach herstellbare und<br>messbare Teilgestalt<br>und Flächenformen<br>bevorzugen   | Geometrie der Führung<br>ist stark vereinfacht<br>worden und ist damit<br>leichter herstellbar und<br>messbar | Vereinfachung von<br>B2 zum Vierkant                        |   |
|   | Q                  | Ansatz und<br>Auslaufläche sollten<br>senkrecht zur Bohrachse<br>stehen   |   |   |   |
|   | V, F               | Unnötig enge<br>Toleranzen und<br>Doppelpassungen<br>vermeiden  |   |   |   |
|   | S                  | Spelfreie Gelenke,<br>Führungen, Gewinde<br>und Steckverbindungen<br>lassen sich mit<br>Justierelementen<br>kostengünstiger<br>realisieren als ohne<br>diese Elemente |   |   |   |

|  |         |   |    |  |    |
|--|---------|---|----|--|----|
| Prinzipien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage  | F, A, S | Prinzip der Symmetrie   |    |  |    |
|  | A, U    | Prinzip der Fehlerjustierung  |    |  |    |
| Richtlinien zur Beherrschung von Unsicherheit in der Montage | F       | Wenn Asymmetrie notwendig, dann deutlich gestalten oder Farbcodierung verwenden   | B1 | B1   | B1 |
|  |         |   | B2 | B2   | B2 |
|  |         |   | B3 | B3   | B3 |
|  |         |   | B4 | B4   | B4 |
|  |         |   | B5 |  | B5 |
|  |         |   | B6 |  | B6 |
|  |         |   | B7 |  | B7 |
|  |         |   |    |  | B8 |
|  |         |   |    |  |    |
|  | F       | Asymmetrische Erkennungsmerkmale an die Außenkante legen  | B1 | B1   | B1 |
|  |         |   | B2 | B2   | B2 |
|  |         |   | B3 | B3   | B3 |
|  |         |   | B4 | B4   | B4 |
|  |         |   | B5 |  | B5 |
|  |         |   | B6 |  | B6 |
|  |         |   | B7 |  | B7 |
|  |         |   |    |  | B8 |
|  |         |   |    |  |    |
|  | V       | Alle Flächen so gestalten, dass sich eindeutige Lagen ergeben und alle sechs Freiheitsgrade z. B. beim Spannen gebunden werden können |    |  |    |
|  | A       | Stützpunkte möglichst weit auseinander legen  |    |  |    |
|  | F       | Selbstpositionierung von Bauteilen anstreben, Positionierhilfen vorsehen  |    |  |    |
|  | F       | Endanschlüsse vorsehen  |    | B2 ist bei montiertem Brenner gegen herausfallen gesichert |    |

|   |       |   |  |  |  |
|---|-------|---|--|--|--|
|   | F     | Zahl der Montageoperationen gering halten   | Weniger Bauteile würde auf Kosten der Justiereinheit gehen. Enge Toleranzen im Führungssystem wären die Folge. |  | Weniger Bauteile würde auf Kosten der Justiereinheit gehen. Enge Toleranzen im Führungssystem wären die Folge. |
|   | F     | Einfache Fügebewegungen vorsehen  |  |  |  |
|   | F     | Anzahl der Fügeseiten und Montageeinrichtungen reduzieren, Teil möglichst nicht neu positionieren | B7, B3 und B1 müssen von verschiedenen Seiten zugeführt werden   |  |  |
|   | V     | Möglichst viele der zu bindenden Freiheitsgrade sperren   |  | B2 und B3 sind nicht gegen herausfallen gesichert  |  |
|   | V     | Lageveränderung gefügter (nicht verbundener) Bauelemente vermeiden                                |  |  |  |
|   | St    | Standardverbindungen einsetzen  |  |  |  |
|   | U     | Pro Koordinatenrichtung eine Justiereinheit   | Stellschrauben liegen in Richtung einer Koordinatenachse   |  |  |
| Grundregeln zur Funktions-<br>erfüllung unter<br>Unsicherheit | V     | Eindeutigkeit   | Schwalben-<br>schwanzführung durch T-<br>Führung ersetzt   | Eindeutigkeit durch vierkantige Form der Brennerstange gesteigert. Auflagefläche der Stange ist nun eindeutig. |  |
|   | F, St | Einfachheit und Informationsaxiom   |  | Vierkantige Gestalt der Brennerstange  |  |
|   | U     | Unabhängigkeitsaxiom  | Hohe Montagevernetzung bezieht sich allerdings nur auf die Höhenverstellung und ist vertretbar                 |  | Hohe Montagevernetzung bezieht sich allerdings nur auf die Höhenverstellung und ist vertretbar                 |
| Prinzipien zur Funktions-<br>erfüllung unter<br>Unsicherheit  | E     | Prinzip der Abschirmung von Störgrößen  | Schutzschildsystem optional  | Schutzschildsystem optional  |  |
|   | V, A  | Prinzip der Verwendung von Spiel  |  |  |  |
|   | A     | Prinzip der Elastizität   | Hätte eine größere Bauteilanzahl und eine aufwendigere Montage zur Folge                                       |  | Hätte eine größere Bauteilanzahl und eine aufwendigere Montage zur Folge                                       |
|   | U     | Prinzip der Redundanz   |  |  |  |
|   | E, A  | Prinzip der geringen räumlichen Ausdehnung von Verbindungen                                       | Große, präzise Flächen an T-Führung  | Präzise Fläche zwischen B1 und B2 verkleinert  |  |
| Richtlinien zum Umgang mit Störgrößen                         | A, S  | Ausdehnungsgerecht  |  |  |  |
|   | F, St | Ergonomiegerecht  |  | Rändelschraube durch Flügelschraube ersetzt (mit Handschuh leichter bedienbar) und von Flamme weggesetzt       |  |

|  |   |  |                             |                             |                             |
|--|---|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | A | Methode der Unterlastung durch Überdimensionierung, bzw. Belastungsredundanz   |                             |                             |                             |
|  | S | Wärmequelle beseitigen, reduzieren oder isolieren  | Schutzschildsystem optional | Schutzschildsystem optional | Schutzschildsystem optional |
|  | S | Wärmequelle konstant halten, um sie zu handhaben   |                             |                             |                             |
|  | E | Bauteile vor unzulässigen Spannungen infolge von schwankender Temperaturen schützen, Kälteschrumpfspannungen vermeiden |                             |                             |                             |
|  | A | Spindelwachstum kompensieren   |                             |                             |                             |





# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Zeitliche Entwicklung zurückgerufener Fahrzeuge in der Automobilbranche in Deutschland zwischen 2010 und 2015. . . . .   | 2  |
| 1.2  | Meldung über den Zündschlossrückruf bei <i>GM</i> im <i>Time Magazin</i> . . . . .   | 3  |
| 1.3  | Modelle des Zündschlosses zur Illustration seiner Funktionsweise. . . . .  | 4  |
| 1.4  | Abhilfemaßnahmen zum Umgang mit Schwankungen am Beispiel des Zündschlosses. . . . .  | 5  |
| 1.5  | Kunststoffeinsatz zur Eliminierung der Exzentrizität des Lastangriffes am Autoschlüssel. . . . .   | 5  |
| 1.6  | Aufbau der Arbeit. . . . .   | 8  |
| 2.1  | Funktionales, struktureles und hierarchisches Konzept zur Modellierung von Systemen. . . . .   | 12 |
| 2.2  | Modell technischer Systeme. . . . .  | 14 |
| 2.3  | Kategorisierung von Eigenschaften technischer Systeme nach <i>Hubka</i> . . . . .  | 15 |
| 2.4  | Produktmodellpyramide nach <i>Ehrlenspiel</i> . . . . .  | 18 |
| 2.5  | Produktmodellpyramide nach <i>Sauer</i> . . . . .  | 19 |
| 2.6  | Produktmodelle der verschiedenen Ebenen der Produktmodellpyramide am Beispiel einer reibkraftschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung. . . . .                                  | 19 |
| 2.7  | Modell des Transformationssystems nach <i>Hubka</i> . . . . .  | 22 |
| 2.8  | Detailliertes Prozessmodell nach <i>Heidemann</i> . . . . .  | 23 |
| 2.9  | Prozessstruktur eines Prozesses zum Ansetzen von Knöpfen an Jeanshosen. . . . .  | 24 |
| 2.10 | Vorgehensmodell zur Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme nach <i>VDI 222X</i> . . . . .  | 26 |
| 2.11 | Vorgehensmodell der strategischen Gestaltung. . . . .  | 28 |
| 2.12 | Vorgehensmodell des taktischen Gestaltens. . . . .   | 29 |
| 2.13 | Zusammenwirken der Prozesskette der Produktentwicklung und der Prozesskette des Produktlebenszyklus im Sinne der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung. . . . . | 31 |
| 2.14 | Hilfsmittel zum methodischen Gestalten. . . . .  | 33 |
| 2.15 | Beispielhafte Übersicht der <i>Gerechtheiten</i> . . . . .   | 33 |
| 2.16 | Vorgehensmodell zur Einbindung des <i>DfM</i> in die <i>GPPE</i> . . . . .   | 34 |
| 2.17 | Klassifizierung von Unsicherheit nach <i>Knetsch</i> . . . . .   | 36 |
| 2.18 | <i>SFB 805</i> Prozessmodell. . . . .  | 38 |
| 2.19 | Unsicherheitsmodell des <i>SFB 805</i> . . . . .   | 39 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.20 | Vorgehensmodell der <i>UMEA</i> . . . . .   | 39 |
| 2.21 | <i>P Modell</i> . . . . .   | 41 |
| 2.22 | Allgemeine Darstellung der <i>Transfer Function</i> . . . . .   | 42 |
| 2.23 | Robust Design Strategien nach <i>Mathias</i> . . . . .  | 44 |
| 2.24 | Vereinfachte Darstellung der externen Schaltung als schwingungsfähiges System. . . . .  | 45 |
| 2.25 | Beispielhafte Darstellung einer 2 Gang Synchronisationseinheit. . . . .   | 45 |
| 2.26 | Klassifizierung von Prinzipien zur Erhöhung der Robustheit nach <i>Jugulum</i> und <i>Frey</i> auf Basis des <i>P Modells</i> . . . . .   | 46 |
| 2.27 | Vorgehensmodell zur Anwendung von Konstruktionshinweisen nach <i>Mattiassen</i> . . . . .   | 47 |
| 2.28 | Wirkungsweisen im Robust Design nach <i>Ebro</i> . . . . .  | 48 |
| 2.29 | <i>Variation Management Framework</i> nach <i>Howard</i> . . . . .  | 49 |
| 2.30 | Zusammenfassung des Standes der Forschung. . . . .  | 50 |
| 3.1  | Elemente der <i>SmArtSys</i> . . . . .  | 52 |
| 3.2  | Forschungsbedarf in Modellen technischer Systeme . . . . .  | 52 |
| 3.3  | Forschungsbedarf zur Identifikation robustheitsförderlicher Konstruktionshinweise. . . . .  | 54 |
| 3.4  | Forschungsbedarf bei der Ableitung von Robustheitskriterien für die Einstufung von Konstruktionshinweisen. . . . .  | 54 |
| 3.5  | Forschungsbedarf bei Vorgehensmodellen zur Anwendung im Robust Design. . . . .  | 55 |
| 4.1  | Alterung von Elastomerfedern durch Kontakt mit Bremsflüssigkeit. . . . .  | 57 |
| 4.2  | Fortpflanzung von Unsicherheit in verketteten Prozessen. . . . .  | 59 |
| 4.3  | Verortung der vier Kategorien von Unsicherheit aus dem <i>SFB 805 Prozessmodell</i> im Prozessmodell nach <i>Heidemann</i> . . . . .  | 60 |
| 4.4  | Parallele Prozesse mit dem technischen Produkt als Operand und Operator. . . . .  | 61 |
| 4.5  | Modell technischer Systeme für die Abbildung von Prozessen. . . . .   | 63 |
| 4.6  | Zusammenhang zwischen dem MTS, den RD-Wirkungsweisen, der Wirkung von Konstruktionshinweisen und den für das Robust Design geeigneten Konstruktionshinweisen. . . . .   | 64 |
| 4.7  | RD-Wirkungsweisen in Produktionsprozessen. . . . .  | 65 |
| 4.8  | Einstellscheiben für eine Kegelradstufe des Hinterachsabtriebs der allradgetriebenen A-Klasse-Fahrzeuge von Mercedes-Benz. . . . .  | 65 |
| 4.9  | Auszug aus Richtlinien zum <i>montagegerechten Gestalten</i> mit dem Ziel eindeutiger Endzustände in der relativen Lage der Fügeteile. . . . .  | 66 |
| 4.10 | Beispiel für Richtlinien zur <i>gussgerechten Gestaltung</i> . Die Schwankungen in den Geometrieigenschaften der Gussstücke werden verringert, indem durch geeignete Maßnahmen Schrumpfspannungen reduziert werden. . . . . | 67 |
| 4.11 | RD-Wirkungsweisen im Nutzungsprozess. . . . .   | 68 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.12 | Modular aufgebautes <i>Fairphone 2</i> . . . . .   | 69  |
| 4.13 | Zwei Varianten von Steckverbindungen im Elektronikbereich. Links, <i>USB-Stecker</i> . Rechts, <i>Lightning-Stecker</i> . . . . .  | 70  |
| 4.14 | <i>Schutzarten</i> am Beispiel einer Kopflampe. . . . .  | 71  |
| 4.15 | Koaxialkabel als Beispiel für die Abschirmung von Störfeldern. . . . .   | 71  |
| 4.16 | Koaxialkabel als Beispiel für die Abschirmung von Störfeldern. . . . .   | 72  |
| 4.17 | Untersuchung der Robustheit zweier Rutschkupplungen nach EIFLER. . .   | 73  |
| 4.18 | Funktionsweise von <i>Friends</i> zur Illustration der RD-Wirkungsweise <i>Unabhängigkeit</i> . . . . .  | 75  |
| 4.19 | Zwei Varianten einer Lagerung. Lagerung a ist uneindeutig in Bezug auf die Radialkraft, Lagerung b weist einen eindeutigen Kraftfluss in radialer Richtung auf. . . . .  | 76  |
| 4.20 | Leitlinie zur Priorisierung des Einsatzes von RD-Wirkungsweisen. . . . .   | 79  |
| 4.21 | Einordnung der <i>SmArtSys</i> in die <i>GPPE</i> . . . . .  | 81  |
| 4.22 | Detailliertes Vorgehensmodell der <i>SmArtSys</i> . . . . .  | 83  |
| 4.23 | Linearführung in der Variante mit statisch überbestimmtem Schlitten. Links: 3D-Modell. Rechts: Experimentell ermittelte Stellkräfte in Abhängigkeit von der Schlittenposition für verschiedene Verschiebungen <i>t</i> . . . . | 85  |
| 4.24 | Freikörperbild der statisch überbestimmten Variante der Linearführung. .   | 85  |
| 4.25 | Freikörperbild einer statisch bestimmten Variante der Linearführung. . .   | 87  |
| 4.26 | Linearführung in einer Variante mit statisch bestimmtem Schlitten. Links: 3D-Modell. Rechts: Experimentell ermittelte Stellkräfte in Abhängigkeit von der Schlittenposition für verschiedene Verschiebungen <i>t</i> . . . . . | 87  |
| 4.27 | Robuste Ausführung einer Linearführung in einem DVD-Player. . . . .  | 88  |
| 5.1  | Zusammenhang zwischen dem MTS, den RD-Wirkungsweisen, der Wirkung von Konstruktionshinweisen und den für das Robust Design geeigneten Konstruktionshinweisen. . . . .  | 89  |
| 5.2  | Vorgehen zur Identifikation von Konstruktionshinweisen in der Fachliteratur. . . . .   | 91  |
| 5.3  | Struktur der Excel-Liste zur Dokumentation der Literaturrecherche. . . .   | 92  |
| 5.4  | Überblick der Literaturrecherche. Die Vernetzung zeigt die Referenzen der Werke untereinander, die Schriftgröße repräsentiert den Vernetzungsgrad der jeweiligen Werke. . . . .  | 93  |
| 5.5  | <i>Hinweissystem</i> zur Einordnung von Konstruktionshinweisen nach <i>Übertragbarkeit</i> und <i>Konkretisierungsgrad</i> , sowie relativer Häufigkeit. . . . .   | 95  |
| 5.6  | Flussdiagramm zur Einstufung der Konstruktionshinweise nach <i>Wirkungsweise im RD</i> . . . . .   | 98  |
| 5.7  | Unsicherheit bei der Ableitung des <i>RopEx-Kataloges</i> . . . . .  | 99  |
| 5.8  | Flussdiagramm zur Adaption der <i>RD-Wirkungsweisen</i> . . . . .  | 100 |
| 5.9  | Flussdiagramm zur Reduktion von Unsicherheit durch verschiedene Beurteiler. . . . .  | 101 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 6.1  | Differential- versus Integralbauweise . . . . .   | 106 |
| 6.2  | Funktionentrennung an einer Lagerung . . . . .  | 106 |
| 6.3  | Spiegelsymmetrische Ausführung einer Schrägverzahnung. . . . .  | 114 |
| 6.5  | Linearführung, links: statisch überbestimmt, rechts: statisch überbestimmt<br>und justierbar . . . . .  | 116 |
| 7.1  | MTS als Ordnungsschema für die thematische Gliederung der Konstruk-<br>tionshinweise im Kontext von Nutzungsprozessen. . . . .  | 118 |
| 7.2  | Zwei Lösungsvarianten einer Mischbatterie. Die rechte Lösung ist einfa-<br>cher durch weniger Bauteile und weniger Prozesse. Durch die geringere<br>Komplexität ist auch die Unsicherheit geringer. . . . . | 121 |
| 7.3  | Unabhängigkeit am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung . . . . .  | 122 |
| 7.4  | Kinematische Analysen eines Balkenmechanismus. . . . .  | 123 |
| 7.5  | Überbestimmtes und kinematisch bestimmtes System . . . . .  | 124 |
| 7.6  | Kraftverzweigung der Axialkraft $F$ auf drei Kegelrollenlager mittels He-<br>belanordnung . . . . .   | 125 |
| 7.7  | Ausgleichskolbendichtung an einem Turboladerrad . . . . .   | 126 |
| 7.8  | Bistabiles Sicherheitsventil . . . . .  | 126 |
| 7.9  | <i>Prinzip der Verwendung von Spiel</i> angewendet auf eine Verbindung zwis-<br>schen einem Schalter und einer Leiterplatte . . . . .   | 127 |
| 7.10 | Prinzip der engen Toleranzen am Beispiel eines kinematisch überbestimm-<br>ten Mechanismus. . . . .   | 128 |
| 7.11 | <i>Prinzip der Selbstpositionierung/-Zentrierung</i> am Beispiel einer Wellen-<br>lagerung zum Ausgleich von Fluchtungsfehlern und Biegedeformationen<br>im Betrieb in drei Lösungsvarianten. . . . .       | 129 |
| 7.12 | Elastizität bei Legosteinen . . . . .   | 130 |
| 7.13 | Grenzmomentkupplung: 1 - Welle, 2 - Scheibenfeder, 3 - Reibscheiben, 4<br>- Zahnrad . . . . .   | 132 |
| 7.14 | Verhindern der Translation des Schwerpunktes . . . . .  | 133 |
| 7.15 | Optimierter Presssitz . . . . .   | 134 |
| 7.16 | Gekoppeltes, entkoppeltes und ungekoppeltes System . . . . .  | 135 |
| 7.17 | Spielinvariante Anordnung einer Druckstelze . . . . .   | 136 |
| 7.18 | Homogene (a) und diversitäre (b) Redundanz . . . . .  | 137 |
| 7.19 | Mit existierenden Fehlern arbeiten am Beispiel einer schiefen Tür . . . .   | 139 |
| 7.20 | Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von Beanspruchung und Beanspruch-<br>barkeit . . . . .  | 140 |
| 7.21 | Vergleich dreier verschiedener Lösungsvarianten zur Leitung der Kraft $F$<br>bei gleicher maximaler Beanspruchung: a indirekt, b indirekt und sym-<br>metrisch und c direkt. . . . .                        | 143 |
| 7.22 | Lösungsmöglichkeiten zum Kraftausgleich . . . . .   | 144 |
| 7.23 | Vergleich von zwei Mechanismen einer Nähmaschine . . . . .  | 145 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 8.1  | Evaluationskonzept. . . . .  | 150 |
| 8.2  | Brennschneidemaschine <i>Quicky</i> im Betrieb. . . . .  | 150 |
| 8.3  | Gestaltungszonen der <i>Quicky</i> . . . . .   | 151 |
| 8.4  | Lösungsvarianten für die <i>Rollenarretierung</i> . . . . .  | 153 |
| 8.5  | Geometrie Größen der Räder und der Führungsschiene. . . . .  | 153 |
| 8.6  | Geometrie Größen der Führungsräder und der Schiene, sowie Kräfte aus Antrieb und Kontakt zwischen Führungsrad und Wange der Führungsschiene. . . . . | 154 |
| 8.7  | Experimentelle Absicherung der Ergebnisse in Bezug auf die Rollenarretierung. . . . .  | 156 |
| 8.8  | Höhenverstellung der <i>Quicky</i> . . . . .   | 157 |
| 8.9  | Beispiel für Iterationsschritte bei der Synthese der Führung. . . . .  | 159 |
| 8.10 | Beispiel für Iterationsschritte bei der Synthese der Führung. . . . .  | 161 |
| 8.11 | Geometrie Größen der Haltestangenprofilquerschnitte der <i>Quicky</i> . . . . .  | 162 |
| 8.12 | Querkraftbiegung und Torsion in der Haltestange der <i>Quicky</i> in Folge Eigengewicht des Brenners. . . . .  | 163 |
| 8.13 | Höhenverstellung der <i>Quicky 2.0</i> nach der Anwendung der <i>SmArtSys</i> . . .  | 165 |
| C.1  | Ausführung mit konstruktivem (a) und fiktivem (b) Festpunkt bei gleichmäßiger Temperaturabnahme von innen nach außen. . . . .                        | 214 |
| C.2  | Schwingungs isolierte Aufhängung eines Motors . . . . .  | 216 |
| C.3  | Gestaltung eines Arbeitsplatzes . . . . .  | 220 |
| C.4  | Aufgabenangemessenheit am Beispiel von Formatvorlagen in Microsoft Word . . . . .  | 221 |
| C.5  | Selbstbeschreibungsfähigkeit anhand der Textausrichtung in Microsoft Word  | 222 |
| C.6  | Erwartungskonformität anhand des Betriebssystems Windows . . . . .   | 223 |
| C.7  | "Rückgängig" Funktion am Beispiel von Microsoft Excel, Texmaker, Foxit Reader, Firefox, Inkscape . . . . .   | 223 |
| C.8  | Fehlertoleranz durch Fehlervermeidung . . . . .  | 224 |
| C.9  | Individualisierbarkeit durch verschiedene Optionen für die Funktion <i>Ko-pieren</i> . . . . .   | 225 |
| C.10 | Gestaltgesetz der Ähnlichkeit (a) und der Nähe (b) . . . . .   | 226 |
| C.12 | Affordance am Beispiel von Drucktüröffnern . . . . .   | 229 |
| C.14 | Vergleich zweier Behälter in Bezug auf Korrosion. . . . .  | 239 |
| C.15 | Wendeschneidplatte am Drehwerkzeug. . . . .  | 244 |
| C.16 | Produktmodularisierung am Beispiel eines Staubsaugers . . . . .  | 248 |

# Tabellenverzeichnis

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.1  | Übersicht der Wirkungsweisen von Robust Design Maßnahmen. . . . .              | 78  |
| 5.1  | Liste mit Hauptautoren. . . . .  | 94  |
| 6.1  | Berücksichtigte Fertigungsverfahren. . . . .                                   | 107 |
| 6.2  | Hinweise zum allgemein fertigungsgerechten Gestalten . . . . .                 | 108 |
| 6.3  | Hinweise zum toleranzgerechten Gestalten . . . . .                             | 110 |
| 6.4  | Hinweise zur mess- und prüfgerechten Gestaltung . . . . .                      | 113 |
| 7.1  | ungünstig/besser Beispiele zur innozenten Gestaltung . . . . .                 | 131 |
| 7.2  | Gestaltungshinweise zum allgemeinen Umgang mit Störgrößen . . . . .            | 145 |
| 8.1  | Übersicht relevanter Größen der <i>Quicky</i> und der Führungsschiene. . . . . | 155 |
| A.1  | Berücksichtigte Literatur. . . . .   | 171 |
| B.1  | Allgemeine Gestaltungshinweise zum Spanen . . . . .                            | 184 |
| B.2  | Hinweise zur bohrgerechten Gestaltung . . . . .                                | 184 |
| B.3  | Hinweise zur fräsgerechten Gestaltung . . . . .                                | 185 |
| B.4  | Hinweise zur schleifgerechten Gestaltung . . . . .                             | 186 |
| B.5  | Hinweise zur drehgerechten Gestaltung . . . . .                                | 187 |
| B.6  | Hinweise zur gesenkschmiedegerechten Gestaltung . . . . .                      | 187 |
| B.7  | Hinweise zur Gestaltung von Kaltfließpressteilen . . . . .                     | 189 |
| B.8  | Hinweise zur Gestaltung von Blechteilen . . . . .                              | 190 |
| B.9  | Hinweise zur gießgerechten Gestaltung . . . . .                                | 192 |
| B.10 | Hinweise zur Gestaltung von Kunststoffteilen . . . . .                         | 194 |
| B.11 | Gestaltungshinweise für die generative Fertigung . . . . .                     | 194 |
| B.12 | Hinweise zur Gestaltung von Achsen und Wellen . . . . .                        | 197 |
| B.13 | Hinweise zur allgemeinen fügegerechten Gestaltung . . . . .                    | 197 |
| B.14 | Hinweise zur schweißgerechten Gestaltung . . . . .                             | 198 |
| B.15 | Hinweise zur Gestaltung von Schraubverbindungen . . . . .                      | 202 |
| B.16 | Richtlinien zur Unterstützung von Lagern und Zuführen . . . . .                | 203 |
| B.17 | Richtlinien zur Unterstützung von Handhaben und Greifen . . . . .              | 203 |
| B.18 | Gestaltungshinweise zur Unterstützung der Positionierung . . . . .             | 205 |
| B.19 | Richtlinien zur Unterstützung des Fügens . . . . .                             | 206 |
| B.20 | Gestaltungshinweise zur Unterstützung des Verbindens . . . . .                 | 209 |

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| B.21 | Gestaltungshinweise zur Unterstützung von Einstellen . . . . .  | 210 |
| B.22 | Hinweise zur Gestaltung von Verpackungen . . . . .  | 211 |
| C.1  | Ungünstige und verbesserte Gleichgewichtslage . . . . .   | 213 |
| C.2  | Gestaltungshinweise zum Umgang mit Wärme . . . . .  | 214 |
| C.3  | Gestaltungshinweise zum Umgang mit mechanischer Beanspruchung . . .   | 216 |
| C.4  | Gestaltungshinweise zum Umgang mit Feuchte . . . . .  | 217 |
| C.5  | Gestaltungshinweise zur elektromagnetischen Verträglichkeit . . . . .   | 218 |
| C.6  | Allgemeine Hinweise zur ergonomischen Gestaltung . . . . .  | 231 |
| C.7  | Hinweise zur Dialoggestaltung . . . . .   | 232 |
| C.8  | Hinweise zur Informationsdarstellung . . . . .  | 233 |
| C.9  | Ungünstige und verbesserte Gestaltung eines Flanschdeckels . . . . .  | 238 |
| C.10 | Hinweise zur verschleißgerechten Gestaltung . . . . .   | 244 |
| C.11 | Auswertung von Dissertationen in Zusammenhang mit Modularisierung in<br>Bezug auf verwendete Methoden zur Modularisierung zur Ermittlung der<br>Grundlagenwerke bzw. Hauptmethoden. . . . . | 247 |
| C.12 | Gestaltungshinweise zur Verbesserung der Produktflexibilität . . . . .  | 248 |
| C.13 | Gestaltungshinweise zur Produktmodularisierung . . . . .  | 250 |
| C.14 | Gestaltungshinweise zur Produktarchitektur . . . . .  | 251 |

# Literatur

- ALBERS, A.; BURSAC, N.; URBANEC, J.; LÜDCKE, R.; RACHENKOVA, G. (2014):** „Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study“. In: *Design for X*. Hrsg. von D. KRAUSE. Hamburg und Hamburg: TuTech Verl. und Techn. Univ. Hamburg-Harburg Univ.-Bibl, S. 13–24.
- ALBERS, A.; MEBOLDT, M. (2007):** „SPALTEN Matrix — Product Development Process on the Basis of Systems Engineering and Systematic Problem Solving“. In: *The Future of Product Development*. Hrsg. von F.-L. KRAUSE. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 43–52.
- ALBERS, A.; ENKLER, H.-G.; OTTNAD, J. (2013):** „Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse – Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact and Channel Model“. In:
- ALBERS, A.; MATTHIESEN, S.; OHMER, M. (2003):** „An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems“. In: *Research for practice - innovation in products, processes and organisations*. Hrsg. von A. FOLKESON; K. GRALEN; M. NORELL; U. SELLGREN. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 147–148.
- ALBERS, A.; BURKHARDT, N.; OHMER, M. (2004):** „Principles for Design on the abstract Level of the Contact & Channel Model“. In: *Tools and methods of competitive engineering*. Hrsg. von I. HORVÁTH. Rotterdam: Millpress, S. 87–94.
- ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M. (1968):** *A pattern language: Towns, buildings, construction*. 36. print. Bd. 2. Center for Environmental Structure series. New York, NY: Oxford Univ. Press.
- ALTSCHULLER, G. S. (1998):** *Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme*. Limitierter Nachdr. der 2. Aufl. Verl Technik. Cottbus: PI - Planung und Innovation.
- ANDERSSON, P. (1996a):** *A process approach to robust design in early engineering design phases*. Bd. 8. Lund: Dept. of Machine Design, Lund Institute of Technology [Institutionen för maskinkonstruktion, Lunds tekniska högsck.]
- ANDERSSON, P. (1996b):** „A semi-analytic approach to robust design in the conceptual design phase“. In: *Research in Engineering Design* 8.4, S. 229–239.



- ANDERSSON, P. (1997a):** „On Robust Design in the Conceptual Design Phase: A Qualitative Approach“. In: *Journal of Engineering Design* 8.1, S. 75–89.
- ANDERSSON, P. (1997b):** „Robustness of Technical Systems in Relation to Quality, Reliability and Associated Concepts“. In: *Journal of Engineering Design* 8.3, S. 277–288.
- ANDREASEN, M. M.; HEIN, L. (1987):** *Integrated product development*. Bedford, UK ET AL.: IFS (Publ.) und Springer.
- ANDREASEN, M. M.; KÄHLER, S.; LUND, T. (1988):** *Design for assembly*. 2. ed., with additional material by K. G. Swift. Bedford: IFS-Publ.
- ARAFI, H. A. (2006):** „Mechanical Design Pitfalls“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 220.6, S. 887–899.
- ARDENNE, M. v., Hrsg. (2005):** *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. Hrsg. von M. v. ARDENNE. 3., überarb., neu strukturierte und wesentl. erw. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch.
- ARVIDSSON, M.; GREMYR, I. (2008):** „Principles of robust design methodology“. In: *Quality and Reliability Engineering International* 24.1, S. 23–35.
- ASHBY, M. F. (2004):** *Materials selection in mechanical design*. 2. ed., reprinted. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- BERTSCHE, B. (2008):** *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- BERTSCHE, B.; GÖHNER, P.; JENSEN, U.; SCHINKÖTHE, W.; WUNDERLICH, H.-J. (2009):** *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer.
- BIRKHOFFER, H. (1980):** „Analyse und Synthese der Funktion technischer Produkte“. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina.
- BIRKHOFFER, H.; KLOBERDANZ, H. (2007):** *Produktentwicklung 1. Vorlesungsskript des Fachgebiets Produktentwicklung und Maschinenelemente zum Wintersemester 2007/08*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- BIRKHOFFER, H.; KLOBERDANZ, H. (2017):** *Produktinnovation*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- BIRKHOFFER, H.; RATH, K.; ZHAO, S. (2012):** „Umweltgerechtes Konstruieren“. In: *Handbuch Konstruktion*. Hrsg. von F. RIEG; R. STEINHILPER. München: Hanser Verlag, S. 561–581.

- BLAKAJ, P. (2014):** „Entwicklung robuster Schnittstellen am Beispiel des SFB 805 Demonstrators“. BT. Darmstadt.
- BLANDING, D. L. (1992):** *Principles of Exact Constraint Mechanical Design*. Rochester, New York: Eastman Kodak Company.
- BLANDING, D. L. (1999):** *Exact constraint: machine design using kinematic principles*. New York, NY: ASME Press.
- BLESSING, L. T.; CHAKRABARTI, A., Hrsg. (2009):** *DRM, a Design Research Methodology*. Hrsg. von L. T. BLESSING; A. CHAKRABARTI. London: Springer London.
- BODE, E. (1991):** *Konstruktions-Atlas: Werkstoff- und verfahrensgerecht konstruieren*. Darmstadt: Hoppenstedt.
- BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. A. (2011):** *Product design for manufacture and assembly*. 3rd edition. Bd. 74. Manufacturing engineering and materials processing. Boca Raton, London und New York: CRC Press.
- BRALLA, J. G., Hrsg. (1999):** *Design for manufacturability handbook*. Hrsg. von J. G. BRALLA. 2. ed. McGraw-Hill Handbooks. London: McGraw-Hill.
- BRUTSCHER, J. (2013):** *Grenzen des Einsatzbereiches von Expansionsschlingen*. Dresden.
- CHAKRABARTI, A., Hrsg. (2002):** *Engineering Design Synthesis: Understanding, Approaches and Tools*. Hrsg. von A. CHAKRABARTI. London: Springer.
- CHASE, K. W.; PARKINSON, A. R. (1991):** „A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies“. In: *Research in Engineering Design* 3.1, S. 23–37, 23–37.
- CHOWDHURY, S. (2002):** *Design for Six Sigma: The Revolutionary process for achieving extraordinary profits*. Chicago, IL: Dearborn Trade Pub.
- CLAUSING, D.; FEY, V. (2004):** *Effective innovation*. New York, N.Y. (ASME, Three Park Avenue. New York, NY 10016): American Society of Mechanical Engineers.
- CLAUSING, D.; FREY, D. D. (2005):** „Improving system reliability by failure-mode avoidance including four concept design strategies“. In: *Systems Engineering* 8.3, S. 245–261.
- CONDOOR, S. S.; KROLL, E. (2008a):** „Using Prametar Analysis for Incorporating Design Principles during Conceptual Design“. In: *Proceedings of the 10th International Design Conference Design 2008, May 19 - 22, 2008, Cavtat - Dubrovnik, Croatia*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 9–18.

- CONDOOR, S. S.; KROLL, E. (2008b):** „Parameter analysis for the application of the principle of direct and short transmission path: A valve-actuator design case study“. In: *Journal of Engineering Design* 19.4, S. 337–357.
- CONRAD, K.-J. (2004):** *Konstruktion und Gestaltung*. In: *Conrad, K.-J. Taschenbuch der Konstruktionstechnik. Mit Tabellen*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- CONRAD, K.-J. (2013):** *Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik*. 6. aktualisierte und erw. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- DAGMAN, A.; SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L. (2006):** „Form division in automotive body design - linking design and manufacturability“. In: *Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIC. Glasgow: The Design Society, S. 495–502.
- DALY, S. R.; YILMAZ, S.; CHRISTIAN, J. L.; SEIFERT, C. M.; GONZALEZ, R. (2010):** „Cognitive Heuristic Use In Engineering Design Ideation“. In: *2010 Annual Conference & Exposition*, S. 15.282.1–15.282.25.
- DALY, S. R.; YILMAZ, S.; CHRISTIAN, J. L.; SEIFERT, C. M.; GONZALEZ, R. (2012):** „Design Heuristics in Engineering Concept Generation“. In: *Journal of Engineering Education* 101.4, S. 601–629.
- DIN 2330 (2013):** *Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 55350-11 (2008):** *Begriffe zum Qualitätsmanagement Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 31000 (2011):** *Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinien*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 6385 (2016):** *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 8044 (2015):** *Korrosion von Metallen und Legierungen, Grundbegriffe und Definitionen*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-11 (2017):** *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-110 (2008):** *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-112 (2015):** *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN ISO 9241-12 (2000):** *Ergonomische Anforderung für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten- Teil 12: Informationsdarstellung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-20 (2009):** *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 20: Leitlinien für die Zugänglichkeit der Geräte und Dienste in der Informations- und Kommunikationstechnologie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DOWNEY, K.; PARKINSON, A.; CHASE, K. (2003):** „An introduction to smart assemblies for robust design“. In: 14.4, S. 236–246.
- EBRO CHRISTENSEN, M. (2015):** „Applying Robust Design in an Industrial Context“. Diss. Lyngby: Technical University of Denmark.
- EBRO, M.; HOWARD, T. J.; RASMUSSEN, J. J. (2012):** „The Foundation for Robust Design: Enabling Robustness through Kinematic Design and Design Clarity“. In: *DESIGN 2012*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. DS. Zagreb: Fac. of Mechanical Engineering and Naval Architecture, S. 817–826.
- EBRO, M.; HOWARD, T. J. (2016):** „Robust design principles for reducing variation in functional performance“. In: *Journal of Engineering Design* 27.1-3, 75–92, Seitenangaben im Text beziehen sich auf die Dissertation Ebro 2015.
- EDER, W. E. (1996):** „Product Development and Engineering Design Need Education for Processes“. In: *Third International Symposium on Product Development in Engineering Education*. Halmstad, S. 113–122.
- EHRENSPIEL, K. (2009):** *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4., aktualisierte Aufl., [elektronische Ressource]. Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser.
- EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.; MÖRTL, M. (2014):** *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H. (2013):** *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser.
- EIFLER, T. (2014):** „Modellgestützte Methodik zur systematischen Analyse von Unsicherheit im Lebenslauf technischer Systeme“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- EIFLER, T.; ENSS, G. C.; HAYDN, M.; MOSCH, L.; PLATZ, R.; HANSELKA, H. (2011):** „Approach for a Consistent Description of Uncertainty in Process Chains of Load Carrying Mechanical Systems“. In: *Applied Mechanics and Materials* 104, S. 133–144.

- EIFLER, T.; HOWARD, T. J. (2017):** „The importance of robust design methodology: Case study of the infamous GM ignition switch recall“. In: *Research in Engineering Design* 8.1, S. 75.
- ENGELHARDT, R. A. (2012):** „Uncertainty Mode an Effects Analysis - heuristische Methodik zur Analyse und Beurteilung von Unsicherheiten in technischen Systemen des Maschinenbaus“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- ENGELHARDT, R.; KOENEN, J. F.; ENSS, G. C.; SICHAU, A.; PLATZ, R.; KLOBERDANZ, H.; BIRKHOFFER, H.; HANSELKA, H. (2010):** „A Model to Categorise Uncertainty in Load-Carrying Systems.“ In: *1st MMEP International Conference on Modelling and Management Engineering Processes*. Hrsg. von ? Cambridge/UK.
- ERIXON, G. (1996):** „Modular Function Deployment (MFD), Support for Good Product Structure“. In: *Proceedings of the 2nd WDK Workshop on Product Structuring 1996*. Hrsg. von MARCEL TICHEM; TON STORM; MOGENS MYRUP ANDREASSEN; KEN J MACCALLUM, S. 1–16.
- ERSOY, M. (1975):** „Wirkfläche und Wirkraum: Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten Konstruieren“. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina.
- ERZ, C. (2016):** „Analyse allgemeiner Gestaltungsregeln hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Baureihenentwicklung und Erweiterung um skalierungsspezifische Aussagen“. BT. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- EYTH, M. (1917):** *Hinter Pflug und Schraubstock: Skizzen aus dem Taschenbuch eines Ingenieurs: Kapitel 15: Berufstragik*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
- FABER, J.; SCHÜRMAN, H.; BECKER, W. (2016):** „Beitrag zur konstruktiven Gestaltung offener, verrippter Profile aus Faser-Thermoplast-Verbunden mit lastpfadgerechten Verstärkungen“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- FAIRPHONE (2017):** *Fairphone*. URL: <https://www.fairphone.com/de/> (besucht am 18.04.2017).
- FAZ (2017):** *Automobilindustrie: Millionen Rückrufe von Autos in Deutschland*. URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/automobilindustrie-millionen-rueckrufe-von-autos-in-deutschland-14065324.html> (besucht am 20.07.2017).
- FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; PAHL, G.; BEITZ, W. (2007):** *Engineering Design - A Systematic Approach // Engineering Design: A Systematic Approach*. 3 // Third Edition. London: Springer-Verlag London Limited.
- FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.; PAHL, G.; BEITZ, W., Hrsg. (2013):** *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Hrsg.

- von J. FELDHUSEN; K.-H. GROTE; G. PAHL; W. BEITZ. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg und Springer Vieweg.
- FELDHUSEN, J.; SCHÜRMANN, H.; ORLOFF, M. (2014):** „Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens“. In: *Dubbel*. Hrsg. von K.-H. GROTE; J. FELDHUSEN. Berlin: Springer, S. 360–396.
- FERRER, I.; RIOS, J.; CIURANA, J. (2009):** „An approach to integrate manufacturing process information in part design phases“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209.4, S. 2085–2091.
- FINGER, S.; DIXON, J. R. (1989a):** „A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes“. In: *Research in Engineering Design* 1.1, S. 51–67.
- FINGER, S.; DIXON, J. R. (1989b):** „A review of research in mechanical engineering design. Part II: Representations, analysis, and design for the life cycle“. In: *Research in Engineering Design* 1.2, S. 121–137.
- FOLKESON, A.; GRALEN, K.; NORELL, M.; SELLGREN, U., Hrsg. (2003):** *Research for practice - innovation in products, processes and organisations: ICED 03, 14th International Conference on Engineering Design ; 19 - 21 August 2003, The Royal Institute of Technology, Stockholm*. Hrsg. von A. FOLKESON; K. GRALEN; M. NORELL; U. SELLGREN. Bd. 31. DS / Design Society. Glasgow: Design Society.
- FORD, R.; BARKAN, P. (1995):** *Beyond Parameter Design - A Methodology Addressing Product Robustness at the Concept Formation Stage*. ASME (DE-Vol.81).
- FREI, N. (2002):** „Der Konstruktionsprozess: Wirkmodelle basierend auf Constraints“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- FRENCH, M. J. (1992a):** *Form, structure and mechanism*. Houndmills: MacMillan.
- FRENCH, M. J. (1992b):** „The opportunistic route and the role of design principles“. In: *Research in Engineering Design* 4.3, S. 185–190.
- FRENCH, M. J. (1993):** „The nature, use and teaching of design principles“. In: *International Journal of Mechanical Engineering Education* 21, S. 241–255.
- FRENCH, M. J. (1994):** „An annotated list of design principles“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 208, S. 229–234.
- FRENCH, M. J. (1999):** *Conceptual design for engineers*. 3. ed. London: Springer.
- FREUND, T.; LOTZ, J.; WÜRTENBERGER, J.; KLOBERDANZ, H. (2016):** „Applying the Elemental interfaces Approach to Kinematic Design“. In: *Proceedings of the*

- DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ; S. ŠKEC. Glasgow: Design Society, S. 193–200.
- FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; CALMANO, S.; HESSE, D.; KLOBERDANZ, H. (2014):** „Robust Design of Active Systems - An Approach to Considering Disturbances within the Selection of Sensors“. In: *Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014*. Hrsg. von T. J. HOWARD; T. EIFLER; T. J. HOWARD. Copenhagen: Technical University of Denmark, DTU.
- FREUND, T.; KLOBERDANZ, H.; LOTZ, J.; WÜRTEMBERGER, J. (2015a):** „An Approach to analysing Interface Uncertainty using the Contact and Channel Model“. In: *Design for life*. Hrsg. von C. WEBER; S. HUSUNG; M. CANTAMESSA; G. CASCINI; D. MARJANOVIC; S. GRAZIOSI. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 53–62.
- FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; KLOBERDANZ, H.; BLAKAJ, P. (2015b):** „An Approach to Using Elemental Interfaces to Assess Design Clarity“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 109–117.
- FU, K. K.; YANG, M. C.; WOOD, K. L. (2016):** „Design Principles: The Foundation of Design“. In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2015*. New York, N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, V007T06A034.
- GAMMA, E.; RIEHLE, D. (2011):** *Entwurfsmuster: Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software*. [6. Aufl.] Klassiker. München: Addison-Wesley.
- GAMWEGER, J. (2009):** *Design for Six Sigma: Kundenorientierte Produkte und Prozesse fehlerfrei entwickeln*. 1. Aufl. München: Hanser.
- GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O. (1995):** *Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien*. München: Hanser.
- GÖHLER, M.; HOWARD, T. J. (2014):** „Framework for the Application of Robust Design Methods and Tools“. In: S. 123–133.
- GÖPFERT, J. (1998):** *Modulare Produktentwicklung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- GÖPFERT, J.; STEINBRECHER, M. (2000):** „Modulare Produktentwicklung leistet mehr: Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen“. In: *Harvard Business Manager* 3, S. 1–17.
- GRAMLICH, S. (2013):** „Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln: Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

- GROCHE, P.; SCHMITT, W.; BOHN, A.; GRAMLICH, S.; ULBRICH, S.; GÜNTHER, U. (2012):** „Integration of manufacturing-induced properties in product design“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61.1, S. 163–166.
- GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHRÖDER, J.; WALL, W. A. (2007):** *Technische Mechanik 2: Elastostatik*. 9., vollst. neu bearbeitete Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J., Hrsg. (2007):** *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. GROTE; J. FELDHUSEN. 22. Aufl. s.l.: Springer-Verlag.
- GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J., Hrsg. (2014):** *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von K.-H. GROTE; J. FELDHUSEN. 24., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer.
- GÜNTHER, J.; EHRENSPIEL, K. (1999):** „Comparing designers from practice and designers with systematic design education“. In: *Design Studies* 20.5, S. 439–451.
- HALE, L. C. (1999):** „Principles and techniques for designing precision machines“. Diss. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory.
- HANSELKA, H.; PLATZ, R. (2010):** „Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“. In: *Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* 11/12, S.55–62.
- HASENKAMP, T. (2010):** „Engineering Design for Six Sigma-a systematic approach“. In: *Quality and Reliability Engineering International*, S. 317–324.
- HASENKAMP, T.; ADLER, T.; CARLSSON, A.; ARVIDSSON, M. (2007):** „Robust Design Methodology in a Generic Product Design Process“. In: *Total Quality Management & Business Excellence* 18.4, S. 351–362.
- HASENKAMP, T.; ARVIDSSON, M.; GREMYR, I. (2009):** „A review of practices for robust design methodology“. In: *Journal of Engineering Design* 20.6, S. 645–657.
- HEIDEMANN, B. (2001):** „Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- HESSE, S. (1994):** *Montage-Atlas: Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren*. Atlas Konstruktion. Darmstadt: Hoppenstedt Technik-Tab.-Verl.
- HOENOW, G.; MEISSNER, T. (2016):** *Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau: Bauteile - Baugruppen - Maschinen*. 4., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- HORVÁTH, I., Hrsg. (2004):** *Tools and methods of competitive engineering: Proceedings of the TMCE 2004 Symposium, Lausanne, Switzerland*. Hrsg. von I. HORVÁTH. Rotterdam: Millpress.



- HOWARD, T. J.; EIFLER, T.; PEDERSEN, S. N.; GÖHLER, S. M.; BOORLA, S. M.; CHRISTENSEN, M. E. (2017): „The variation management framework (VMF): A unifying graphical representation of robust design“. In: *Quality Engineering* 7.1, S. 1–10.
- HOWARD, T. J.; EBRO, M.; EIFLER, T.; GÖHLER, M.; PEDERSEN, S. N.; CHRISTIANSEN, A.; RAFN, A. (2014): „The Variation Management Framework (VMF) for Robust Design“. In: *Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014*. Hrsg. von T. J. HOWARD; T. EIFLER; T. J. HOWARD. Copenhagen: Technical University of Denmark, DTU.
- HUBER, F.; DAENZER, W. F., Hrsg. (2002): *Systems Engineering: Methodik und Praxis*. Hrsg. von F. HUBER; W. F. DAENZER. 11., durchges. Aufl. Zürich: Verl. Industrielle Organisation.
- HUBKA, V. (1976): *Theorie der Konstruktionsprozesse: Analyse der Konstruktionstätigkeit*. Hochschultext. Berlin und Heidelberg: Springer.
- HUBKA, V. (1984): *Theorie Technischer Systeme: Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Hochschultext. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- HUBKA, V.; EDER, W. E. (1992): *Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Ableitungen*. 1. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer.
- HUBKA, V.; EDER, W. E. (1988): *Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design*. Berlin: Springer.
- JILG, C. (2015): „Konstruktionshilfen zur methodischen Entwicklung umweltgerechter Produkte“. MT. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- JUGULUM, R.; FREY, D. D. (2007): „Toward a taxonomy of concept designs for improved robustness“. In: *Journal of Engineering Design* 18.2, S. 139–156.
- KAMM, L. J. (1993): *Designing cost-efficient mechanisms: Minimum constraint design, designing with commercial components, and topics in design engineering*. Society of Automotive Engineers. Electronic publications. Warrendale, Pa. (400 Commonwealth Dr., Warrendale PA USA): Society of Automotive Engineers.
- KEESE, D. A.; TILSTRA, A. H.; SEEPERSAD, C. C.; WOOD, K. L. (2007): „Empirically-Derived Principles for Designing Products With Flexibility for Future Evolution“. In: *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Hrsg. von ?, S. 483–498.
- KESSELRING, F. (1954): *Technische Kompositionslehre: Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- KIRCHNER, E. (2007):** *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben: Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten*. VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KIRCHNER, E.; BIRKHOFFER, H. (2017):** *Maschinenelemente und Mechatronic II*. 4. Aufl. Aachen: Shaker.
- KLEIN, B. (2013):** *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KLOBERDANZ, H.; ENGELHARDT, R.; MATHIAS, J.; BIRKHOFFER, H. (2009):** „Process Based Uncertainty Analysis – an Approach to Analyze Uncertainties Using a Process Model“. In: *Design theory and research methodology*. Hrsg. von M. NORELL BERGENDAHL. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 465–474.
- KLOCKE, F.; KÖNIG, W. (2008):** *Drehen, Fräsen, Bohren*. 8., [neu bearb.] Aufl. Bd. / Fritz Klocke; Wilfried König ; Bd. 1. VDI-Buch. Berlin: Springer.
- KNETSCH, T. (2004):** „Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen“. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- KOEN, B. V. (1988):** *Definition of the Engineering Method*. 4. print. Washington: American Society for Engineering Education.
- KOLLER, R. (1998):** *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 4., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.
- KOSTER, M. (2008):** *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren: Konstruktionsprinzipien für das präzise Bewegen und Positionieren*. 5e, herz. dr. Baarn: HB Uitgevers.
- KRAUSE, D.; EILMUS, S. (2011):** „A methodical approach for developing modular product families“. In: *Impacting society through engineering design*. Hrsg. von S. J. CULLEY. Bd. 4. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 299–308.
- KRAUSE, W., Hrsg. (2012):** *Grundlagen der Konstruktion: Elektronik ; Elektrotechnik ; Feinwerktechnik ; Mechatronik*. Hrsg. von W. KRAUSE. 9. Aufl. Studienbücher der technischen Wissenschaften. München Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- KRAUSE, W.; BÜRGER, E., Hrsg. (2000):** *Gerätekonstruktion: In Feinwerktechnik und Elektronik*. Hrsg. von W. KRAUSE; E. BÜRGER. 3., stark bearb. Aufl. München: Hanser.
- KREYE, M. E.; YEE, M. G.; NEWNES, L. (2011):** „Manifestation of Uncertainty - a Classification“. In: Hrsg. von S. J. CULLEY; T. C. MCALOONE; T. J. HOWARD; P. J. CLARKSON. The Design Society, S. 96–107.

- KROLL, E.; JANSSON, D. G.; CONDOOR, S. S. (2001):** *Innovative conceptual design: Theory and application of parameter analysis*. Cambridge und New York: Cambridge University Press.
- KRÜGER, A.; BIERKAND, J. t.; BLANK, D. (2016):** *HMI-Tage im Herbst*.
- KURZ, U.; HINTZEN, H.; LAUFENBERG, H. (2009):** *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik*. 4., erw. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- LACKMANN, J.; VILLWOCK, J. (2014):** „Stabilitätsprobleme“. In: *Dubbel*. Hrsg. von K.-H. GROTE; J. FELDHOUSEN. Berlin: Springer, S. 127–132.
- LEE, B.; SAITOU, K. (2003):** „Decomposition-Based Assembly Synthesis for In-Process Dimensional Adjustability“. In: *Journal of Mechanical Design* 125.3, S. 464.
- LEMBURG, J. P. (2009):** „Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese“. Diss. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- LEYER, A. (1964):** *Maschinenkonstruktionslehre: Heft 2. Allgemeine Gestaltungslehre*. Bd. 2. Technica-Reihe. Basel: Birkhäuser.
- LINDEMANN, U. (2009):** *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- MARZ, J. (2005):** „Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (mPEP) für werkzeuggebundene Mikrotechniken“. Diss. Karlsruhe.
- MATHIAS, J. (2015):** „Auf dem Weg zu robusten Lösungen – Modelle und Methoden zur Beherrschung von Unsicherheit in den Frühen Phasen der Produktentwicklung“. Dissertation. Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt.
- MATHIAS, J.; KLOBERDANZ, H.; ENGELHARDT, R.; BIRKHOFFER, H. (2010):** „Strategies and principles to design robust products“. In: *Design 2010*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 341–350.
- MATTHECK, C. (2010):** *Denkwerkzeuge nach der Natur*. 1., unveränd. Nachdr. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie Campus Nord.
- MATTHIASSEN, B. (1997):** „Design for robustness and reliability: Improving the quality consciousness in engineering design“. Diss. Lyngby.
- MATTHIESEN, S. (2002):** „Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells “Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen” zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.

- MATTSON, C. A.; WOOD, A. E. (2014):** „Nine Principles for Design for the Developing World as Derived From the Engineering Literature“. In: *Journal of Mechanical Design* 136.12, S. 121403.
- MCADAMS, D. (2003):** „Identification and codification of principles for functional tolerance design“. In: *Journal of Engineering Design* 14.3, S. 355–375.
- MØRUP, M. (1993):** „Design for Quality“. Dissertation. Lyngby: Technical University of Denmark.
- MULET, E.; VIDAL, R. (2008):** „Heuristic guidelines to support conceptual design“. In: *Research in Engineering Design* 19.2-3, S. 101–112.
- NEUDÖRFER, A. (2014):** *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*. 6., aktual. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- NIEMANN, G.; HÖHN, B.-R.; WINTER, H. (2005):** *Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. 4., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- NORMAN, D. A. (2013):** *The design of everyday things*. Revised and expanded edition. New York, NY: Basic Books.
- NOWACK, M. L. (1997):** „Design guideline support for manufacturability“. Diss. Cambridge: Selwyn College.
- N-TV (13.03.2014):** *Problem-Heli der Bundeswehr: Der NH90 rostet*. URL: <http://www.n-tv.de/politik/Der-NH90-rostet-article12451481.html> (besucht am 18.04.2017).
- OHMER, M. (2008):** „Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact Channel Model C&CM“. In: *Forschungsberichte*. Hrsg. von A. ALBERS. Bd. 32. Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung.
- OKHOLM, A. B.; RASK, M.; EBRO, M.; EIFLER, T.; HOLMBEG, M.; HOWARD, T. J. (2014):** „Improving Process Capability Database Usage for Robust Design Engineering by Generalising Measurement Data“. In: *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference, May 19 - 22, 2014, Dubrovnik - Croatia*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 1133–1144.
- ORLOFF, M. A. (2006):** *Grundlagen der klassischen TRIZ: Ein Praktisches Lehrbuch DES Erfinderischen Denkens Für Ingenieure*. VDI-Buch. Dordrecht: Springer.
- OTTO, K. N.; WOOD, K. L. (2001):** *Product design: Techniques in reverse engineering and new product development*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (2007):** *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer.
- PALANI RAJAN, P. K.; VAN WIE, M.; CAMPBELL, M.; OTTO, K.; WOOD, K. (2003):** „Design for Flexibility - Measures and Guidelines“. In: *Research for practice - innovation in products, processes and organisations*. Hrsg. von A. FOLKESON; K. GRALEN; M. NORELL; U. SELLGREN. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 1–10.
- PALANI RAJAN, P. K.; VAN WIE, M.; CAMPBELL, M. I.; WOOD, K. L.; OTTO, K. N. (2005):** „An empirical foundation for product flexibility“. In: *Design Studies* 26.4, S. 405–438.
- PARK, G.-J. (2007):** *Analytic Methods for Design Practice*. London: Springer-Verlag London Limited.
- PEARCE, E. (2003):** „Designing Active Smart Features to Provide Nesting Forces in Exactly Constrained Assemblies“. MT. Provo UT: Brigham Young University.
- PHADKE, M. S. (1986):** „Design Optimization Case Studies“. In: *AT&T Technical Journal* 65.2, S. 51–68.
- PIMMLER, T.; EPPINGER, S. (1994):** „Integration Analysis of Product Decompositions“. In: *ASME Design Theory and Methodology Conference Minneapolis 1994*, S. 1–10.
- PONN, J.; LINDEMANN, U. (2008):** *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- RATH, K.; BIRKHOFFER, H.; BOHN, A. (2011):** „Which Guideline is most relevant? Introduction of a pragmatic design for energy efficiency tool“. In: *Design for X, design to X*. Hrsg. von S. J. CULLEY. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 293–301.
- ROPOHL, G. (2009):** *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. s.l.: KIT Scientific Publishing.
- ROTH, K. (1996):** *Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung: Mit 48 Konstruktionskatalogen und 52 Lösungsammlungen*. 2. Aufl., wesentlich erw. und neu gestaltet. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 3. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer.
- ROTH, K. (2000):** *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre*. 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 1. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer.

- ROTH, K. (2001):** *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 2: Kataloge*. 3. Aufl., mit wesentlichen Erg. Bd. / Karlheinz Roth ; Bd. 2. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer.
- SANGELKAR, S.; COWEN, N.; MCADAMS, D. (2012):** „User activity – product function association based design rules for universal products“. In: *Design Studies* 33.1, S. 85–110.
- SAUER, T. (2006):** „Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen“. Diss. Düsseldorf: Technische Universität Darmstadt.
- SCHILLING, M. (1982):** „Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik“. Diss. Ilmenau.
- SCHLEICH, B.; WARTZACK, S. (2013):** „Process-Oriented Tolerancing - A Discrete Geometry Framework“. In: *Design for harmonies*. Hrsg. von U. LINDEMANN. DS / The Design Society. Castle Cary, Somerset: Design Society, S. 061–070.
- SCHLICK, C. M.; BRUDER, R.; LUCZAK, H. (2010):** *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SCHOENEBERG, K.-P. (2014):** *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- SCHUH, G.; LENDERS, M.; BENDER, D. (2009):** „Szenariorobuste Produktarchitekturen“. In: *Vorausschau und Technologieplanung*. Hrsg. von J. GAUSEMEIER. HNI-Verlagsschriftenreihe. Paderborn: HNI, S. 99–119.
- SFB 805 (2012):** „SFB 805 Prozessmodell: Modellierungsstrategie zur Abbildung von Unsicherheiten in Prozessen“. Darmstadt.
- SHNEIDERMAN, B.; PLAISANT, C. (2005):** *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction*. 4. ed. Boston, Mass.: Pearson.
- SINGH, V.; SKILES, S. M.; KRAGER, J. E.; WOOD, K. L.; JENSEN, D.; SIERAKOWSKI, R. (2009):** „Innovations in Design Through Transformation: A Fundamental Study of Transformation Principles“. In: *Journal of Mechanical Design* 131.8, S. 081010.
- SLOCUM, A. H. (1992):** *Precision machine design*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- SMITH, J.; CLARKSON, P. J. (2000):** „A method for the improved robustness of mechanical design“. In:
- SMITH, J.; JOHN CLARKSON, P. (2005):** „A method for assessing the robustness of mechanical designs“. In: *Journal of Engineering Design* 16.5, S. 493–509.

- SOBEK II, D. K.; WARD, A. C.; LIKER, J. K. (1999):** „Toyota’s Principles of Set Based Concurrent Engineering“. In: *Sloan Management Review* 40.2, S. 67–83.
- SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.; CARLSON, J. S. (2006a):** „Managing physical dependencies through location system design“. In: *Journal of Engineering Design* 17.4, S. 325–346.
- SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.; CARLSON, J. (2006b):** „Virtual Geometry Assurance for effective Product Realization“. In: *st Nordic Conference on Product Lifecycle Management st Nordic Conference on Product Lifecycle Management st Nordic Conference on Product Lifecycle Management - NordPLM’06, Göteborg, January 25-26 2006*.
- SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.; DAHLSTRÖM, S. (2006c):** „Computer-aided robustness analysis for compliant assemblies“. In: *Journal of Engineering Design* 17.5, S. 411–428.
- SPITZ, M. (2012):** „Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile“. Dissertation. Duisburg: Universität Duisburg-Essen.
- STACHOWIAK, H. (2013):** *Allgemeine Modelltheorie*. Softcover reprint of the hardcover 1. ed. 1973. Wien: Springer.
- STEINHILPER, W.; SAUER, B., Hrsg. (2012):** *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. Hrsg. von W. STEINHILPER; B. SAUER. 8. Aufl. 2012. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- STEINHILPER, W.; SAUER, B.; ALBERS, A., Hrsg. (2012):** *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Hrsg. von W. STEINHILPER; B. SAUER; A. ALBERS. 7. Aufl. Bd. / Waldemar Steinhilper; Bernd Sauer (Hrsg.) ; 2. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg.
- STOLL, H. W. (1994):** „Strategies for Robust Product Design“. In: *Journal of Applied Manufacturing Systems*, S. 3–8.
- STONE, R. B. (12.1997):** „Towards a Theory of Modular Design“. Dissertation. Austin: University of Texas.
- SUH, N. P. (1990):** *The principles of design*. Bd. 6. Oxford series on advanced manufacturing. New York: Oxford University Press.
- SUH, N. P. (2001):** *Axiomatic design: Advances and applications*. The MIT-Pappalardo series in mechanical engineering. New York, NY: Oxford University Press.
- SUHM, A. (1993):** „Produktmodellierung in wissensbasierten Konstruktionssystemen auf der Basis von Lösungsmustern“. Diss. Karlsruhe.

- SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. (2003):** *Process selection: From design to manufacture*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, S. (2000):** *Robust engineering: learn how to boost quality while reducing costs & time to market*. New York, NY: McGraw-Hill.
- TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C. (1990):** *Quality engineering in production systems*. [3. Dr.] McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. New York: McGraw-Hill.
- TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. (2005):** *Taguchi's quality engineering handbook*. Hoboken, N.J, Livonia, Mich: John Wiley & Sons.
- TATE, D. (1999):** „A roadmap for decomposition: activities, theories and tools for system design“. Dissertation. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology.
- TEKKAYA, A. E.; ALLWOOD, J. M.; BARIANI, P. F.; BRUSCHI, S.; CAO, J.; GRAMLICH, S.; GROCHE, P.; HIRT, G.; ISHIKAWA, T.; LÖBBE, C.; LUEG-ALTHOFF, J.; MERKLEIN, M.; MISIOLEK, W. Z.; PIETRZYK, M.; SHIVPURI, R.; YANAGIMOTO, J. (2015):** „Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64.2, S. 629–653.
- THIELE, M. (2017):** „Systematisches Gestalten einer Brennschneidemaschine unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten“. Master Thesis. Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt.
- THORNTON, A. C. (2004):** *Variation risk management: Focusing quality improvements in product development and production*. Hoboken, NJ: Wiley.
- THUNISSEN, D. P. (2005):** „Propagating and Mitigating Uncertainty in the Design of Complex Multidisciplinary Systems“. Diss. Pasadena, California: California Institute of Technology.
- TJALVE, E.; HUBKA, V. (1978):** *Systematische Formgebung für Industrieprodukte*. 1. Aufl. Düsseldorf und Goldach: VDI-Verl. und Fachpresse Goldach.
- ULLMAN, D. G. (2010):** *The mechanical design process: [product discovery, project planning, product definition, conceptual design, product development, product support]*. 4. ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston u.a.: McGraw-Hill Higher Education.
- ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. (2008):** *Product design and development*. 4. ed., internat. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin.
- VAN WIE, M. J. (2002):** „Designing Product Architecture: A Systematic Method“. Diss. Austin: University of Texas.



- VASCONCELOS, F. (2015):** „Potenziale und Grenzen generativer Fertigungsverfahren und ihre Berücksichtigung bei der Produktentwicklung“. Masterthesis. Darmstadt.
- VDI 2206 (2004):** *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2221 (1993):** *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2223 (2004):** *Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Systematic embodiment design of technical products*. Bd. 03.100.40. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2225 (1998):** *Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 2242 (2016):** *Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- VDI 2244 (1988):** *Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- VITRUVIUS; REBER, F. v. (2012):** *Zehn Bücher über Architektur: De architectura libri decem*. 2. Aufl. Wiesbaden: Marixverl.
- WAGNER, C.; ROOS, M.; GRAMLICH, S.; KLOBERDANZ, H. (2016):** „Process integrated design guidelines - Systematically linking manufacturing processes to product design“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ; S. ŠKEC. Glasgow: Design Society, S. 739–748.
- WÄLDELE, M. (2012):** *Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte: Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmen-basierte Produktentwicklung: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011*. Als Ms. gedr. Bd. 414. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verl.
- WÄLDELE, M.; BIRKHOFFER, H. (2008):** „Properties and Characteristics and Attributes and... - an Approach on structuring the Description of Technical Systems“. In: *DS 57: Proceedings of AEDS 2008 Workshop, Pilsen, Czech Republic*. Hrsg. von V. VANEK; S. HOSNEDL; J. BARTAK, S. 19–34.
- WHITNEY, D. E. (2004):** *Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development*. Oxford series on advanced manufacturing. New York: Oxford University Press.
- WIEDEMANN, J. (2007):** *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. 3. Auflage. Klassiker der Technik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- WIRTZ, M.; CASPAR, F. (2002):** *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität: Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen*. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.
- WUTTKE, F.; BOHN, A.; BOHN, M.; SUYAM-WELAKWE, N.-A. (2011a):** „Robustness of Inventive Design Solutions - Transferring the Robust Design Focus from Production Process to Development Process“. In: *Proceedings of the 21st CIRP Design Conference, Korea 2011 : Interdisciplinary Design*. Hrsg. von M. K. THOMPSON. KAIST, S. 123–129.
- WUTTKE, F.; FEUSTEL, F.; BOHN, M.; CSERNAK, S.; BOHN, A. (2011b):** „Early Robustness Optimization of Automotive Modules - Regarding the Key Impact of the Human Factor“. In: *Impacting society through engineering design*. Hrsg. von S. J. CULLEY. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 175–284.
- YAMMIYAVAR, P. (2005):** „Usability heuristics and their role in designing vehicles – A case study of an electric-hybrid vehicle body design“. In: *Journal of the Indian Institute of Science* 85.Mar.-Apr. S. 67–82.
- ZIER, S. (2013):** „Elementarmethoden in der Produktentwicklung: Identifikation methodischer Prinzipien und ihre Potenziale für Lehre, Praxis und Forschung“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

## Eigene Veröffentlichungen

### 2014

- FREUND, T.; SARNES, J.; KLOBERDANZ, H.; WÜRTEMBERGER, J. (2014a):** „Modeling of use phase variability and application in Robust Design and Ecodesign“. In: *Proceedings of the DESIGN 2014, 13th International Design Conference*, May 19 - 22, 2014, Dubrovnik - Croatia. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ. Bd. 77. Glasgow: The Design Society, S. 1063–1072.
- LOTZ, J.; FREUND, T.; RATH, K.; KLOBERDANZ, H. (2014):** „Estimating uncertainty of scaled products using similarity relations and law of growth“. In: *Proceedings of the DESIGN 2014, 13th International Design Conference*, May 19 - 22, 2014, Dubrovnik - Croatia. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ. Glasgow: The Design Society, S. 273–282.
- FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; CALMANO, S.; HESSE, D.; KLOBERDANZ, H. (2014b):** „Robust Design of Active Systems - An Approach to Considering Disturbances within the Selection of Sensors“. In: *Proceedings of the First International Symposium of Robust Design 2014*. Hrsg. von T. J. HOWARD; T. EIFLER. Copenhagen: Technical University of Denmark, DTU.

### 2015

- FREUND, T.; KLOBERDANZ, H.; LOTZ, J.; WÜRTEMBERGER, J. (2015a):** „An Approach to analysing Interface Uncertainty using the Contact and Channel Model“. In: *Design for life*. Hrsg. von C. WEBER; S. HUSUNG; M. CANTAMESSA; G. CASCINI; D. MARJANOVIC; S. GRAZIOSI. Bd. 80,6. DS / Design Society. Glasgow: Design Society, S. 53–62.
- LOTZ, J.; FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; KLOBERDANZ, H. (2015):** „Principles to Develop Size Ranges of Products with Ergonomic Requirements, Using a Robust Design Approach“. In: *Procedia Manufacturing* 3, S. 6305–6312.
- FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; KLOBERDANZ, H.; BLAKAJ, P. (2015b):** „An Approach to Using Elemental Interfaces to Assess Design Clarity“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 109–117.
- MELZER, C. M.; KRECH, M.; KRISTL, L.; FREUND, T.; KUTTICH, A.; ZOCHOLL, M.; GROCHE, P.; KOHLER, M.; PLATZ, R. (2015):** „Methodical Approaches to Describe and Evaluate Uncertainty in the Transmission Behavior of a Sensory Rod“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 205–217.
- WÜRTEMBERGER, J.; GRAMLICH, S.; FREUND, T.; LOTZ, J.; ZOCHOLL, M.; KLOBERDANZ, H. (2015):** „Uncertainty in Product Modelling within the Development Process“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807, S. 89–98.

## 2016

**FREUND, T.; LOTZ, J.; WÜRTEMBERGER, J.; KLOBERDANZ, H. (2016):**

„Applying the Elemental interfaces Approach to Kinematic Design“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ; S. ŠKEC. Glasgow: Design Society, S. 193–200.

**LOTZ, J.; FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; KLOBERDANZ, H. (2016):**

„Uncertainty in Size Range Development - An Analysis of Potential for a New Scaling Approach“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ; S. ŠKEC. Glasgow: Design Society, S. 341–360.

**WÜRTEMBERGER, J.; LOTZ, J.; FREUND, T.; KLOBERDANZ, H. (2016):**

„Development of a Methodical Approach to Handle Uncertainty during the Process of Product Modelling“. In: *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference*. Hrsg. von D. MARJANOVIĆ; M. ŠTORGA; N. PAVKOVIĆ; N. BOJČETIĆ; S. ŠKEC. Glasgow: Design Society, S. 579–588.

## 2017

**FREUND, T.; WÜRTEMBERGER, J.; LOTZ, J.; ROMMEL, C.; KIRCHNER, E.**

**(2017):** „Design for Robustness - Systematic Application of Design Guidelines to Control Uncertainty.“ In: *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*, Bd. 4. Unter Mitarbeit von A. MAIER, S. ŠKEC, H. KIM, M. KOKKOLARAS, J. OEHMEN, G. FADEL et al. Vancouver, 21-25.08.2017 (Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 21), S. 277-286.

**WÜRTEMBERGER, J.; LOTZ, J.; FREUND, T.; KIRCHNER, E (2017):** „An Approach to Handle Uncertainty during the Process of Product Modelling.“ In: *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*, Bd. 4. Unter Mitarbeit von A. MAIER, S. ŠKEC, H. KIM, M. KOKKOLARAS, J. OEHMEN, G. FADEL et al. Vancouver, 21-25.08.2017 (Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 21), S. 59-68.

## Betreute studentische Arbeiten

### 2014

**ROOS, T.:** *Sicherung von Produktqualität in dezentralen Entwicklungsprojekten.* Masterarbeit, 2014

**WESTHÄUSER, B.:** *Methodik zur Entwicklung modularer Produkte und ihre Potentiale in Bezug auf den Einsatz im Robust Design.*, Masterarbeit, 2014

**CHRYSLIDIS, N.;HARTMANN, C.;HARTMANN, F.;SCHÖNEBERGER, D.;ZÖLLER, C.:** *Entwicklung eines aktiven Fahrwerkssystems zur Beeinflussung der Querdynamik eines Formula Student Rennwagens.* Advanced Design Project (ADP), 2014

### 2015

**BLAKAJ, P.:** *Analyse der spezifischen Unsicherheit in modularen Systemen - Schnittstellenunsicherheit.* Bachelor Arbeit 2015

**MEI, M.:** *Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung von Alterung und Verschleiß im Modell technischer Systeme.* Master Arbeit, 2015

**BÜTTNER, C.:** *Berücksichtigung transienter Prozesse bei der Entwicklung robuster Produktfamilien.* Master Arbeit, 2015

**DEBEL, A.:** *Gestaltung robuster Schnittstellen in einem modularen Konzept einer Car2X ECU unter Berücksichtigung von Kostenaspekten.* Studienarbeit 2015

**WEIDMANN, J.:** *Abschätzung der Eignung von Robust Design Prinzipien zur verallgemeinerten Anwendung bei der Beherrschung von Unsicherheit.* Bachelor Arbeit 2015

### 2016

**WÜST, M.:** *Identifikation von Übertragungsfunktionen mit Hilfe von Elementarschnittstellen am Beispiel des SFB 805 Demonstrators.* Bachelor Arbeit 2016

**PALM, C.:** *Entwicklung robuster Lösungsalternativen für eine Schnittstelle des SFB Demonstrators auf Basis der Gestaltungsregeln nach Pahl/Beitz.* Bachelor Arbeit 2016

**ROMMEL, C.:** *Gestaltungsregeln, -richtlinien und -prinzipien für die Synthese robuster Lösungen.* Bachelor Arbeit 2016

**KAKAR, H.:** *Potentiale der Gestaltungsgrundregel einfach für die Entwicklung robuster Produkte, sowie deren Operationalisierung.* Master Arbeit 2016

**BARWASSER, A.:** *Numerische Absicherung der Wirksamkeit des Elementarschnittstellenansatzes zur Synthese robuster Produkte am Beispiel einer Linearführung.* Master Arbeit 2016

## 2017

**THIELE, M.:** *Systematisches Gestalten einer Brennschneidemaschine unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten.* Master Arbeit 2017

## Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 9. November 2017

---

(T. Freund)

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

|              |                   |
|--------------|-------------------|
| Name         | Tillmann Freund   |
| Geburtsdatum | 5. November 1983  |
| Geburtsort   | Seeheim-Jugenheim |
| Nationalität | Deutsch           |

## Ausbildung und berufliche Tätigkeit

|                 |  |
|-----------------|--|
| 06/2003         | Abitur, Ludwigs Georgs Gymnasium, Darmstadt  |
| 10/2004-08/2012 | Studium an der Technischen Universität Darmstadt, Studiengang Allgemeiner Maschinenbau. Abschluss Dipl.-Ing.   |
| 01/2009-08/2009 | Auslandssemester, TECNUN Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra, San Sebastian, Spanien  |
| 09/2009-12/2015 | Selbstständigkeit, Entwickeln und Fertigen von Sportgeräten aus Faser-Kunststoff-Verbunden   |
| 03/2013-08/2013 | IT-Berater, Geschäftsprozesse und Produktdatenaustausch, :em engineering methods AG, Darmstadt   |
| 09/2013-04/2018 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente<br>pmd<br><br>Mitglied des interdisziplinären Sonderforschungsbereiches SFB 805 Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus |
| 01/2018         | Promotionsprüfung zum Doktoringenieur an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau. Gesamturteil: Mit Auszeichnung bestanden   |